



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

ZPRACOVÁNÍ KERAMICKÝCH STŘEPŮ PRO ARCHEOLOGII

PROCESSING OF CERAMIC FRAGMENTS FOR ARCHEOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Šunka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

BRNO 2016

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Pavel Šunka

ID: 154892

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Zpracování keramických střepů pro archeologii

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte řídicí elektroniku pro zpracování keramických střepů v archeologii. Měření navrhněte tak, aby bylo možné určit měrnou hmotnost předložených vzorků. Volbu jednotlivých komponent zdůvodněte. Zvažte vhodný způsob zobrazování měřených hodnot, pro další zpracování výsledky zaznamenávejte ve vhodném formátu na SD kartu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 2.6.2016

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Předkládaná práce dává náhled do problematiky měření měrné hmotnosti a nasákavosti keramických střepů pro archeologické účely. Zaměřuje se na návrh a výrobu poloautomatického měřicího přístroje s mikročipem PIC24FJ64GA004, ukládání naměřených dat na SD kartu a jejich následné zpracování pomocí tabulkového procesoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

měření měrné hmotnosti, měření nasákavosti, archeologická keramika, PIC24FJ64GA004, tenzometr

ABSTRACT

Presented thesis gives an insight into measuring the density and water absorption of ceramic fragments for archaeological purpose. It focuses on the design and construct of semi-automatic measuring device with a microchip PIC24FJ64GA004, storage of data on the SD card and subsequent processing by a spreadsheet.

KEYWORDS

measurement of density, water absorption measurement, archaeological ceramics, PIC24FJ64GA004, tensometer

ŠUNKA, P. *Zpracování keramických střepů pro archeologii*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 36 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Zpracování keramických střepů pro archeologii jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlovi Šteffanovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu. Dále za pomoc v otázkách archeologických a zapůjčení vzorků pro měření Mgr. Ondřeji Šedovi, Ph.D.

V Brně dne 1. 6. 2016

.....

podpis autora.

OBSAH

Úvod	6
1 Měření nasákavosti a měrné hmotnosti	7
1.1 Historie měření	7
1.2 Příprava vzorků keramiky	7
1.3 Nasákavost	8
1.3.1 Způsob měření	9
1.4 Měrná hmotnost	9
2 Návrh přístroje	11
2.1 Senzory	12
2.1.1 Senzor měření hmotnosti	12
2.1.2 Teplotní senzor	17
2.2 Datová část	20
2.2.1 Paměťové úložiště	20
2.2.2 Display	21
2.3 Řídící část	22
2.3.1 Klávesnice	22
2.3.2 Mikrokontrolér	23
2.4 Napájecí část	24
3 Realizace přístroje	26
3.1 Senzor měření hmotnosti	26
3.1.1 Snímač hmotnosti	26
3.1.2 Operační zesilovač INA125	27
3.1.3 A/D převodník	28
3.2 Teplotní senzor	29
3.3 LCD display	35
3.4 Klávesnice	36
3.5 Mechanické části a krytování	37
4 Testování	38
4.1 Kalibrace	38
4.2 Ovládání přístroje	38
4.3 Zkušební měření	38

4.3.1	Druh vody	40
5	Závěr	42

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

NH	Hmotnostní nasákavost
m_s	Hmotnost suchého vzorku
m_v	Hmotnost mokrého vzorku váženého v suché misce
m_w	Hmotnost mokrého vzorku váženého v mokré misce
ρ	Hustota
m	Hmotnost
V	Objem
R	Odpor
l	Délka
S	Plocha
ρ	Rezistivita
ΔR	Změna odporu
Δl	Změna délky
k	Koeficient tenzometru
G	Zesílení
α	Teplotní součinitel odporu
ΔT	Změna teploty
B	Materiálová konstanta termistoru
A	Referenční konstanta termistoru
k	Aproximační konstanta monokrystalického senzoru
U_t	Termoelektrické napětí
A, B, C	Materiálové konstanty použitých kovů termoelektrického článku
XyRozlišení	
ST	Strmost
Δt	Změna času
NH_{abs}	Absolutní nasáknutí
t_{abs}	Absolutní čas nasáknutí
RHX	ReHydroXylation dating, gravimetrická metoda datování keramiky
NTC	Negative temperature coefficient, negativní teplotní koeficient
PTC	Positive temperature coefficient, pozitivní teplotní koeficient

LCD	Liquid crystal display, displej z tekutých krystalů
MMC	Multi Media Card, standard paměťové karty s technologií paměti flash
SD	<i>Secure Digital</i> , paměťová karta
VSS	Zemní pin/ vodič
VDD	Nábojový pin/ vodič
MCU	Microcontroller unit, jednočipový počítač
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> , sériové periferní rozhraní
CS/SS	Chip select/ Slave select, pin pro výběr mezi perifériemi.
CLK	CLOCK, pin pro přijímání hodinového signálu
MOSI	Master Out Slave In datový výstupní pin z MCU při komunikaci SPI
MISO	Master In Slave Out datový vstupní pin z MCU při komunikaci SPI
CMD	CoMmanD, příkaz
MBR	<i>Master Boot Record</i> , hlavní spouštěcí záznam
BS	Zaváděcí sektor
ROW	Pojmenování řádku klávesnice
COL	Pojmenování sloupce klávesnice

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Průběh vysoušení keramiky v čase.	8
Obr. 2: Blokové schéma přístroje.	11
Obr. 3: Foliový tenzometr (meandrová struktura) [9].	13
Obr. 4: Tenzometrický snímač KT470/300g.	14
Obr. 5: INA 125 v pouzdře SOIC [16].	15
Obr. 6: A/D převodník ADS8319IDGST v pouzdře MSOP [17].	16
Obr. 7: Napěťová reference ADR365AUJZ-REEL7 v pouzdře TOSP [25].	17
Obr. 8: Termoelektrický článku měď - konstantan.	19
Obr. 9: DS18B20 ve voděodolném pouzdře [19].	20
Obr. 10: SD karta s popisem vývodů.	20
Obr. 11: Slot na SD kartu SDK-9BNS-K13-GS-TB [20].	21
Obr. 12: LCD display RC1602B-GHY-CSXD [22].	22
Obr. 13: Numerická maticová klávesnice [23].	23
Obr. 14: PIC24FJ64GA004 [24].	24
Obr. 15: Napájecí tří- výstupový zdroj ECL15UT03-T [26].	25
Obr. 16: Zapojení kontaktů tenzometrického snímače.	27
Obr. 17: Zapojení zesilovače INA125 [11].	27
Obr. 18: Zapojení zesilovače ADS8319IDGST [13].	28
Obr. 19: Zapojení pinů senzoru DS18B20.	29
Obr. 20: Diagram procedury pro konverzi teploty mezi MCU a DS18B20.	29
Obr. 21: Diagram procedury pro čtení teploty mezi MCU a DS18B20.	30
Obr. 22: Zapojení SD karty pro komunikaci SPI protokolem [27].	31
Obr. 23: Diagram inicializace SD karty z knihovny SPI_SD.h.	32
Obr. 24: Zobrazení Master Boot Record se zvýrazněným místem pro partition tabulky.	33
Obr. 25: Ukázka zápisu souboru v Root adresáři.	34
Obr. 26: Ukázka Fat tabulka s pěti soubory.	34
Obr. 27: Rozložení pinů LCD displeje.	35
Obr. 28: Inicializace driveru ST7066U [30].	36
Obr. 29: Uspořádání pinů maticové klávesnice.	37
Obr. 30: Dizajn přístroje.	37
Obr. 31: Graf časové nasákavosti keramických vzorů.	39

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Srovnání jednotlivých vah a tenzometrů.	14
Tabulka 2: Srovnání přístrojových zesilovačů.....	14
Tabulka 3: Srovnání sigma-delta analogově digitálních převodníků.	16
Tabulka 4: Srovnání napěťových referencí.....	17
Tabulka 5: Srovnání teplotních senzorů.	19
Tabulka 6: Srovnání patič pro SD karty.	21
Tabulka 7: Srovnání LCD 16x2 displayů.	22
Tabulka 8: Srovnání 16- ti bitových PIC kontrolérů.	24
Tabulka 9: Výčet potřebných napájecích napětí.	24
Tabulka 10: Srovnání napájecích zdrojů.	25
Tabulka 11: Rozlišení snímače při vstupním napětí 10 V a zesílením výstupního napětí 1004.....	26
Tabulka 12: Zkušební měření přístrojem.	39
Tabulka 13: Závislost nasákavosti keramiky na druhu vody.	40

SEZNAM PŘÍLOH

A OBVODOVÉ ZAPOJENÍ.....1

B DESKA PLOŠNÉHO SPOJE.....2

ÚVOD

Práce se zaměřuje na jeden z problémů archeologické obce, který je způsoben nejen podfinancováním, tohoto vědního oboru, ale i netechnickým způsobem uvažováním zainteresovaných osob. Čehož si je mnoho archeologů vědomo a tak za podpory archeologického ústavu AV ČR byla vytvořena tato práce.

Samotný text obsahuje dvě vědní roviny – prolnutí dvou velice odlišných světů. Humanitního a technického. Pro humanitní vědu je důležitá část, pojednávající o způsobech měření. O chybách, kterých se dopouštěli předešní měřitelé. O možných nových náhledech na složitou problematiku měření a pootvívá tak vrátka kvantitativnímu vyhodnocení dosud opomíjených dat. Může se stát základem pro sjednocení postupu měření a tedy vzniku samostatné archeologické normy pro měření zkoumaných veličin. Může také být základem pro vědce, zajímající se o danou problematiku.

Druhou vědní rovinu - technickou zastupuje přístroj na měření zkoumaných veličin. Práce do této vědní disciplíny nedodává žádné nové poznatky. Zpracovává však starší fakta a snaží se čtenáři co možná nejjednodušeji přiblížit technické problémy potřebné pro sestavení přístroje. Proto jsou někdy opomíjeny detaily, na úkor praktickým postřehům ze sestavování přístroje.

Cílem práce je tedy zmapování možnosti měření nasákavosti a měrné hmotnosti archeologického keramického materiálu pomocí vah. Zabývá se přípravou vzorků pro měření, sušením vzorků, dále zkoumá okolnosti, které mohou mít vliv na samotné měření. Kriticky hodnotí předešlé postupy měření a nastiňuje nové postupy, jak z měření získat co možná nejvíce dat.

Dalším cílem je návrh a zkonstruování prototypu pro měření daných veličin. Zajištění bezpečného a jednoduchého ovládání přístroje s co možná nejpresnějšími výsledky měření. Vytvoření kvalitativního záznamu na SD kartu, aby následné časové náklady na vyhodnocení dat byly co možná nejmenší.

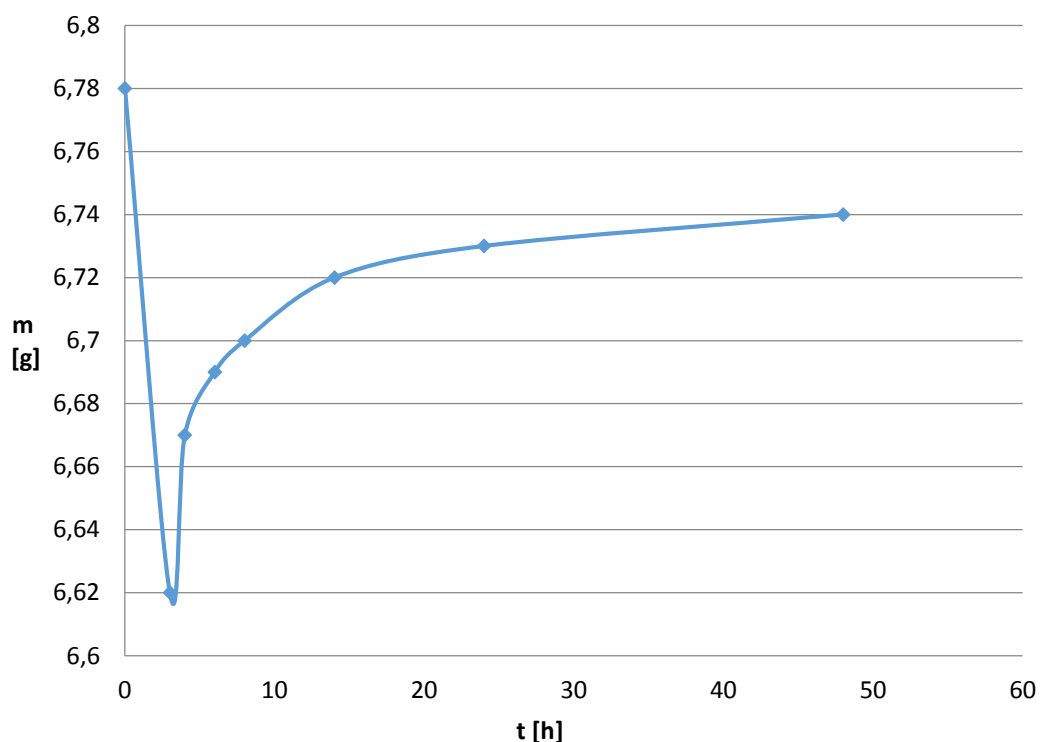
1 MĚŘENÍ NASÁKAVOSTI A MĚRNÉ HMOTNOSTI

1.1 Historie měření

Keramika, jako archeologický pramen se objevuje, již s počátky archeologie. Jedná se většinou o nejhojnější a mnohdy jediné nálezy, které máme k dispozici z dané lokality. Určité druhy experimentů a měření na poli archeologickém, přišli až s podrobnějším zkoumáním těchto pramenů nejen zařazením do určité doby, ale i zamýšlením se nad funkčností, postupem výroby a účelem předmětů v době používání. Zvyšující se trend analyzování a měření vlastností staré keramiky je patrný až v posledních dvaceti letech. Mnohdy jsou to experimenty velmi orientační a experimentátor z nich vyvozuje někdy ne zcela korektní a konkrétní závěry. Na druhou stranu jsou již popsány i velmi kvalitní postupy zjišťování různých veličin staré keramiky. Archeologové se jimi snaží potvrdit, či vyvrátit svoje teze. Tuší, že nasákavost a měrná hustota vedle dalších veličin, mohou mít při katalogizaci, zjišťování výroby a účelu keramiky, jakousi vypovídající hodnotu, která jim doposud uniká. Analýzy a výstupy však nejsou zcela prozkoumány a zavedeny do běžné archeologické praxe, která je mnohdy oproti jiným vědním oborům zastaralá a podfinancovaná. Obvykle při měření postupují nejen podle publikací archeologického charakteru a vlastního uvážení, ale také podle norem určených pro měření stavebního materiálu [1].

1.2 Příprava vzorků keramiky

Vzorky keramiky musí být zbaveny všech nečistot, větších konzervátorských úprav, čímž se rozumí laku či lepidla. Malé identifikační číslo by na měření mělo mít jen malý vliv. V případě jiných konzervátorských úprav, by měl pracovník provádějící měření zvážit, zda vzorky zbavením těchto úprav nepoškodí nebo znehodnotí celé měření. Vzorky by měly být řádně vysušeny. Podle konzervátorských skript Slezské univerzity v Opavě by vzorky měly být uloženy po dobu čtrnácti dnů v pokojové teplotě a malé vlhkosti vzduchu [1]. Publikace Technologie keramiky uvádí, že je potřeba keramiku vysušit za teploty vyšší než je 105°C po dobu 2 hodin [2]. Nad tuto teplotu se vypaří všechna nevázaná voda z keramiky. Poté nechat keramiku vychladnout a následně měřit. Při procesu chladnutí v normálních prostorách s nenulovou vzdušnou vlhkostí keramika opět nasaje určité procento vody a tím se stabilizuje. Obr. 1 ukazuje průběh vysoušení keramiky. V první fázi je mokrý střep vložený do pece při teplotě 110 °C po dobu 2 hodin, následně vytáhnutý a ponechaný při pokojové teplotě po dobu 50- ti hodin.



Obr. 1: Průběh vysoušení keramiky v čase.

Vzorky by měly být voleny s určitou obezřetností s přihlédnutím k jejich stavu a velikosti. Vzorky jsou namáčeny a otírány hadříkem. Tedy je na místě volit vzorky z kvalitní pálené keramiky, která se neodlamuje či nedrolí. Také vzorky se zbytky malování v případě potřeby jejich zachování by neměly být používány, jelikož při otírání povrchu keramiky by bylo zdobení setřeno. Velikost vzorků volíme dle váživosti a přesnosti váhy tak, abychom váhu nezničili, ale výsledné naměřené veličiny byly s přesností nejméně 5% pro orientační měření. Pro přesnější měření kolem 1%.

1.3 Nasákavost

Nasákavost je vlastnost látky na sebe navázat určité množství tekutiny. Vzorek může tekutinou nasáknout buď vnořením do tekutiny, nebo ponecháním v páře. V případě ponechání vzorku v páře můžeme mluvit o absorpci par.

Nasákavosti lze rozdělit následovně:

- objemová: určuje, kolik procent objemu tekutiny vzorek nasákl vůči svému objemu,
- hmotnostní: říká, o kolik procent vzorek navýšil svoji hmotnost oproti suchému vzorku.

Nasákavostí v archeologii, která přebírala postupy především ze stavebních norem, je myšlena nasákavost hmotnostní NH [%]. Hmotnostní nasákavost je definována jako poměr rozdílu hmotnosti suchého keramického střepu (m_s) a nasáknutého (m_v) v lázni po určitém čase k hmotnosti suché keramiky. Výsledek je převeden do procent, vynásobením stem, což vidíme na vzorci 1 [2].

$$NH = \frac{m_v - m_s}{m_s} * 100 \text{ [%]}. \quad (1)$$

Lázní je tu zvolená voda, hlavně kvůli ekonomickému faktoru a minimálnímu ovlivňování vzorku vodou. Faktorem ve kterém se již mnozí autoři měření rozcházejí je teplota lázně, doba měření, ale i použitá voda.

1.3.1 Způsob měření

Jsou hlavní 2 pohledy provádění měření. První říká, že by se měla keramika 2 hodiny povařit ve vodě [2]. Druhá, že keramika by měla nasakovat v lázni pokojové teploty [4]. Samozřejmě, že jsou ještě další metody, ale s nasákavostí, na kterou se zaměřuje práce, souvisí jen okrajově. Jako je např. RHX datování nebo absorpce par.

Povařením keramiky ve vodě, se proces nasakování urychlí. A to díky teplotní roztažnosti keramiky. Póry se více otevřou a voda, o menší hustotě, lépe nasákne. Následně se keramika musí nechat ve vodě vychladnout a odležet 24 hodin [2]. Jsou známy i postupy, kdy se vzorky měřily hned po 2 hodinách varu. Postup se nedoporučuje, jelikož ze vzorku po vytáhnutí uniká voda v plynném skupenství. Také se může stát, že teplé vzorky ohřejí misku váhy a tím i samotný senzor, který je více či méně teplotně závislý. Hustota vody je nezanedbatelně menší. Pro vzorek nebude jistě dobrý ani teplotní šok. Dle stavební normy [5] stačí, když vzorky ve vodě vychladnou na pokojovou teplotu a můžeme je změřit.

Nasáknutí vzorku za pokojové teploty je poměrně zdoluhavější metoda. Názory se rozcházejí na dobu nasáknutí keramiky. Nejkratším úsekem, který byl použit, je 30 minut nasáknutí, jež použili pánové Šebela a Weber při měření neolitické keramiky [6]. Slezská univerzita v Opavě udává změřit vzorek po 24 hodinách ve vodní lázni [1]. K době 24 hodin se přiklání i další autoři.

1.4 Měrná hmotnost

Měrná hmotnost-hustota, je oproti nasákavosti v archeologii méně používanou analýzou, ale přitom je její postup zvládnut na velmi dobré úrovni. Měrná hmotnost ρ [kg/m^3] se vypočítá poměrem hmotnosti m [kg] k objemu V [m^3] dle vzorce 2:

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]}. \quad (2)$$

Hmotnost se váží na vahách, jako v případě nasákavosti. A objem se určuje dvěma metodami za použití Archimédova zákona. První metodou, méně používanou je pomocí odměrného válce s vodou. Kdy rozdíl mezi hladinou před ponořením vzorku a po ponoření nám dá objem vzorku. Bohužel při použití jednoho odměrného válce na vzorky s velkým rozdílem objemu, malé vzorky budou změřeny s velkou chybou, také vizuální odečet může zanést značnou chybu. Lepším řešením se zdá použití vztlakové síly vody.

Pro měření je potřeba jen váha a nádoba s vodou. Vahami změříme vztlakovou sílu, kterou voda nadnáší těleso. A pomocí vzorce 3 [2] vypočteme měrnou hmotnost:

$$\rho = \frac{m_s}{m_v - m_w} * \rho_{H_2O} \text{ [g/cm}^3\text{]}, \quad (3)$$

m_s [g] je hmotnost vysušeného vzorku, m_v [g] hmotnost vzorku mokrého zváženého na vzduchu a m_w [g] hmotnost vzorku mokrého, zváženého ve vodě. Hustota vody je ρ_{H_2O} [gcm⁻³].

Hustota vody lze zjistit změřením nenasákavého tělesa o známé hustotě. Modifikací předchozího vzorce následovně:

$$\rho_{H_2O} = \frac{m_w}{m_s} * \rho \text{ [g/cm}^3\text{]}, \quad (4)$$

m_s [g] je hmotnost vzorku váženého na vzduchu, m_w [g] je hmotnost vzorku zváženého ve vodě.

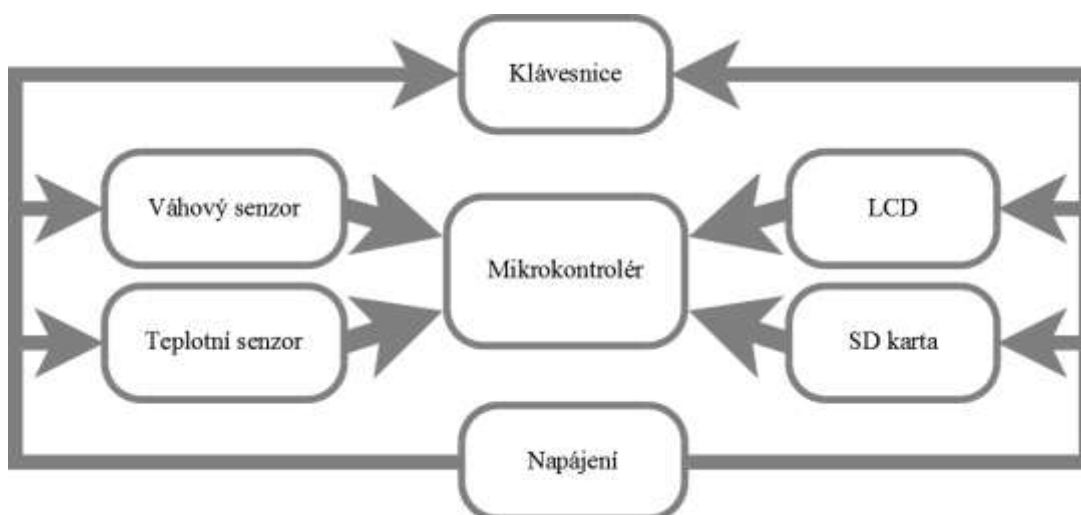
Měrná hmotnost má vypovídající hodnotu, hlavně co se týká materiálu použitého na výrobu keramických předmětů. Dohromady s nasákavostí ale mohou prozradit více, než jen základní fakta. Z naměřených parametrů lze dále například vypočítat objemová nasákavost a zdánlivá pórovitost.

2 NÁVRH PŘÍSTROJE

Měření nasákavosti a měrné hmotnosti pro archeologii mají spíše experimentální charakter. Měření byla prováděna na malých sériích vzorků na komerčních vahách a údaje zaznamenávány ručně. Což kromě časové náročnosti na zápis, může vnést i chyby způsobené lidským faktorem. Naskytá se tedy otázka polo automatizovaného přístroje k měření a zpracování dat pro přenos do počítače.

V následujících kapitolách je shrnut návrh elektroniky přístroje na polo automatizovaný měřicí přístroj. Všechny ceny komponent v následující kapitole jsou bez DPH. Text je členěn na jednotlivé bloky viz obr. 2.

- **senzorický blok:** váhový senzor a senzor teplotní,
- **datový blok:** Display a paměťové úložiště,
- **řídící blok:** Klávesnice a mikrokontrolér,
- **napájecí blok:** Napájení všech předešlých bloků.



Obr. 2: Blokové schéma přístroje.

2.1 Senzory

Pro měření hmotnosti a objemu keramiky bude použit tenzometrický snímač s přístrojovým zesilovačem a 16- ti bitovým AD převodníkem. Pro zjišťování teploty vody bylo do návrhu zakomponováno teplotní čidlo s digitálním výstupem.

2.1.1 Senzor měření hmotnosti

Pro získání dat ze senzorů hmotnosti je zapotřebí nejen samostatný snímač, ale také přístrojový zesilovač, pro zesílení výstupního napětí ze snímače a následný AD převodník pro převod analogového signálu na signál digitální. Pro potřebu převodníku ještě je přidáno referenční napětí. Součástky musí být voleny s vysokým důrazem na kvalitu výstupní veličiny.

Snímač hmotnosti

Hmotnost respektive síla, jsou neelektrické veličiny, a proto je nelze měřit přímou metodou. Pro převod síly resp. hmotnosti využíváme deformace a následné změny odporu, optických nebo magnetických účinků či změnu náboje [7]. V běžné praxi se nejvíce používá díky ceně i přesnosti odporových tenzometrů. Odporové tenzometry můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin:

- polovodičové,
- kovové.

I přes to, že polovodičové tenzometry mají přesnost cca. 60x větší než kovové, kvůli jejich nelineární závislosti odporu na deformaci, je pro naši aplikaci nevyužijeme. Naproti tomu kovové tenzometry mají odpor lineárně závislý tlaku, který způsobuje deformaci odporového snímače. Podle známého vzorce odporu:

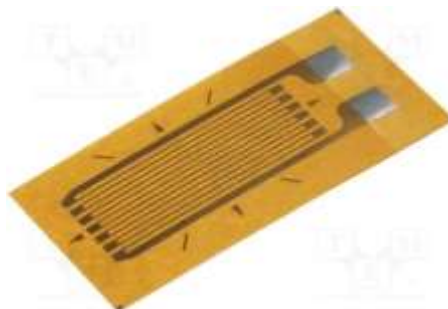
$$R = \rho * \frac{l}{S} [\Omega]. \quad (5)$$

Kde ρ [$\Omega \cdot m$] je rezistivita l [m] délka vodiče a S [m^2] plocha průřezu vodiče. Z tohoto vztahu lze vidět, že odpor je přímo závislý na délce vodiče a nepřímo závislý na změně plochy průřezu. Při deformaci uvažujeme pro změnu odporu ΔR [Ω], převážně délkovou změnu Δl [m], kterou využíváme k výpočtu[8]:

$$\frac{\Delta R}{R} = k * \frac{\Delta l}{l} [\Omega], \quad (6)$$

k je koeficient tenzometru, který je pro kovové tenzometry přibližně 2.

Kovové tenzometry se tedy vyrábí dlouhé a tenké, aby změna délky byla co možná největší. Proto se užívá meandrové struktury a velmi malého průřezu cesty viz obr. 3.



Obr. 3: Foliový tenzometr (meandrová struktura) [9].

Pro prodloužení cesty tenzometru je důležité zatížení. Zatěžuje se buď v tahu, nebo v ohybu. Pro účely vážení se tenzometry pevně přichytí na mírně pružný, obvykle hliníkový, nosník jako na obr. 4. Změna délky resp. odporu tenzometru vznikne ohybem nosníku. Ve většině aplikací se tenzometry zapojují do tzv. Wheatstoneova můstku.

Naskýtají se 3 možnosti zapojení:

- **čtvrtinový můstek:** 1 tenzometr a 3 rezistory,
- **poloviční můstek:** 2 tenzometry na jedné straně nosníku a 2 rezistory,
- **celý můstek:** 2 tenzometry na vrchní straně a 2 tenzometry na spodní straně nosníku.

Zapojením do celého Wheatstoneova můstku zvýšíme jeho citlivost 4x oproti čtvrtinovému můstku. Nespornou výhodou je i celková teplotní kompenzace, v případě identických tenzometrů [8].

Kritéria pro výběr nosníku:

- váživost minimálně 200 g,
- přesnost minimálně 0,05g.

Z důvodu velké ceny jednotlivých tenzometrů a složitého řešení nosníku, bylo rozhodnuto, pořídit již vytvořený tenzometrický snímač KT470/300g, který zobrazuje obr. 4. Snímač má deklarovanou váživost 300 g. V tabulce 2 lze vidět srovnání 4 samotných tenzometrů a vah s potřebnou váživostí a přesností.

Tabulka 1: Srovnání jednotlivých vah a tenzometrů.

Typ:	Váživost [g]:	Cena [Kč]:
Snímač KT470/300g	300	238
Váha Touchscreen	300	1246
Váha Digital scale	300	440
4 fóliové tenzometry TEN-TFS10/120-P	Dle použitého nosníku	4 x 241



Obr. 4: Tenzometrický snímač KT470/300g.

Přístrojový zesilovač

Přístrojový zesilovač je potřebnou součástí zapojení pro zesílení signálu, v našem případě výstupního stejnosměrného napětí z tenzometrického snímače, na měřitelnou mez i při nejmenším zatížení senzoru (0,05 g).

Kritéria pro výběr zesilovače:

- zesílení 500-5000,
- nízký šum.

Pro naši aplikaci byl vybrán přístrojový zesilovač **INA 125** pro možnost vysokého zesílení, relativně snadnému zapojení s vnitřní referencí i díky příznivé ceně.

Tabulka 2: Srovnání přístrojových zesilovačů.

Typ:	Zesílení:	Šum [$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ při $f=1\text{kHz}$]:	Cena [Kč] :
INA 125	4-10 000	38	135
AD620	1-10 000	9	203
INA128UAE4	1-10 000	8	205
LT1167ACS8	1-10 000	7,5	359

Základní vlastnosti INA125 [11]:

- klidový proud: 460 μA ,
- vnitřní napěťová reference: 1,24V; 2,5V; 5V; 10V,
- teplotní nestabilita: 0.2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ max.,
- rychlost přeběhu 0,2 V/ μs ,
- vstupní napěťový offset $\pm 250 \mu\text{V}$ max.,
- CMRR: 100 dB min.,
- šum: 38 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ při 1kHz,
- napájecí rozsah:
jednostranné napájení 2,7 V – 36 V,
oboustranné napájení $\pm 1,35 \text{ V} - \pm 18 \text{ V}$.

Nastavením velikosti rezistoru R_g je možné definovat zesílení přístrojového zesilovače podle vzorce [11]:

$$G = 4 + \frac{60\text{k}\Omega}{R_g} \quad [-]. \quad (7)$$

Rezistor musí být teplotně stabilní, aby nebylo měněno zesílení. Co nejbliž k napájecím pinům je doporučeno vložit 0,1 μF kondenzátor spojený se zemí. Zabrání rušivým vlivům napájecího napětí. Vyrábí se jako 16- ti pinové DIP nebo SOIC pouzdro viz obr. 5.



Obr. 5: INA 125 v pouzdře SOIC [16].

AD Převodník

Naskýtá se možnost využít zabudovaného AD převodníku v mikrokontroléru, ale u běžných mikročipů se setkáváme s 10- ti bitovými a menšími převodníky. Rozsah 10- ti bitového převodníku je však nedostačující. Proto pro převod použijeme 16- ti bytový převodník.

Převod se stává z několika kroků [12]:

- **vzorkování signálu v čase:** odběr vstupního signálu v impulzy definovaném čase,
- **kvantování vzorků v úrovni:** zaokrouhlení odebraného vzorku na nejbližší kvantizační úroveň,
- **kódování:** vyjádření kvantových úrovní čísly určitého kódu.

Důležitými parametry převodníků jsou:

- **rozlišení** - dáno počtem bitů a přivedeným referenčním napětím,
- **přesnost** - odchylka od ideálního převodu,
- **teplotní stabilita**,
- **rychlost převodu** - čas, za který digitální výstup převede změnu analogového signálu.

Kritéria pro výběr převodníku:

- 16- ti bitový převod,
- frekvence vzorkování minimálně 400 kSPS,
- referenční napětí min. 5 V.

Z velkého množství převodníků byl vybrán **ADS8319IDGST**, díky velmi nízké ceně a dostačujícím parametrům.

Tabulka 3: Srovnání analogově digitálních převodníků.

Typ:	Napájecí napětí [V]:	Vzorkovací kmitočet [kSPS]:	Cena[Kč]:
ADS8865IDGS	2,7 – 3,6	400	330
ADS8331IPW	2,7 – 5,5	500	337
ADS8319IDGST	2,7 – 5,50	500	256

ADS8319IDGST je 16- ti bitový SAR převodník od firmy Texas instrument. Je vyráběn v 10- ti vývodovém MSOP pouzdře viz obr. 6. S MCU komunikuje čtyř nebo tři vodičovým sériovým portem.

Základní parametry [13] :

- vzorkovací frekvence 500 kSPS,
- napájecí rozsah: 2,7V- 7 V,
- proudová spotřeba: 4,5 mA,
- offset error 0,03 % FSR.



Obr. 6: A/D převodník ADS8319IDGST v pouzdře MSOP [17].

Napět'ová reference

Pro potřeby A/D převodníku byl do návrhu zahrnut zdroj referenčního napětí. Referenční napětí z přístrojového zesilovače INA 125 není možné použít z důvodu velkého odběru proudu převodníkem. Byla tedy vybrána sériová napět'ová reference.

Kritéria pro výběr napět'ové reference:

- výstupní referenční napětí 4-5 V,
- nízký šum a počáteční přesnost,
- minimální výstupní proud 300 μA .

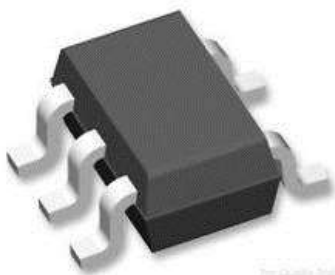
Pro napět'ovou referenci byla vybrána součástka ADR365AUJZ-REEL7 v pouzdře TOSP 5 a to z důvodu nízkého šumu.

Tabulka 4: Srovnání napět'ových referencí.

Typ:	Výstupní šum [μV p-p] (0.1 Hz - 10 Hz):	Cena [Kč]:
ADR365AUJZ-REEL7	6,8	67
LM4120AIM5-5.0/NOPB	20	30
LT6660HCDC-5	20	58

Základní parametry ADR365AUJZ-REEL7 [25] :

- výstupní referenční napětí 5 V_r,
- výstupní proud -1 mA až 5 mA_r,
- počáteční přesnost 8 mV_r,
- teplotní koeficient ± 25 ppm/ $^{\circ}\text{C}$.



Obr. 7: Napět'ová reference ADR365AUJZ-REEL7 v pouzdře TOSP [25].

2.1.2 Teplotní senzor

Při měření vztlakové síly, působící na vzorky keramiky, je třeba hlídat teplotu vody. Jelikož s teplotou vody se mění její hustota. Měření by mělo být hlavně informativního charakteru, protože se nepředpokládají větší výkyvy teploty než ± 10 $^{\circ}\text{C}$, a tedy i výkyvy hustoty ± 5 kgm^{-3} . Ve výpočtu vztlakové síly dle vzorce 5 nevzniká chyba větší než 0,5%.

Teplotní senzory pro běžné použití měření jsou vyráběny, buď kovové, nebo polovodičové součástky.

Jejich dělení je následující:

- **odporové snímače teploty:** Kovové, polovodičové (termistory, monokrystalové),
- **termoelektrický článek.**

Kovové odporové senzory využívají lineární teplotní závislosti odporu. Se zvyšující se teplotou u nich odpor stoupá. Což lze odvodit z rovnice [14]:

$$R_T = R_0(1 + \alpha\Delta T)[\Omega] . \quad (8)$$

$R_0 [\Omega]$ je odpor při teplotě 0°C , $\Delta T [\text{K}]$ rozdíl teploty a $\alpha [\text{K}^{-1}]$ teplotní součinitel odporu. Rovnice lze použít jen v rozsahu $0- 100^\circ\text{C}$.

Termistory jsou polovodičové odporové součástky. Nelineární teplotní závislost odporu je až 60 x větší. Odpor při rostoucí teplotě klesá u NTC termistorů (negastorů) podle vzorce [14]:

$$R_T = R_r * e^{B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r})} [\Omega]. \quad (9)$$

$R_r [\Omega]$ je odpor při referenční teplotě $T_r [\text{K}]$, $B [\text{K}]$ materiálová konstanta, $T [\text{K}]$ je teplota zmenšeného odporu.

Převážně stoupající nelineární charakteristiku odporu na teplotě mají PTC termistory (pozistory), která je dána vztahem [14]:

$$R_T = R_r * e^{AT} \quad (10)$$

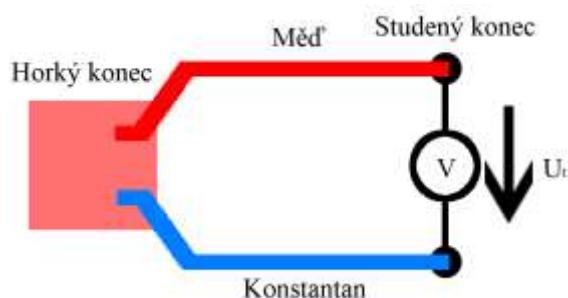
$R_r [\Omega]$ je odpor při referenční teplotě $T_r [\text{K}]$, $A = 0,16 \text{ K}^{-1}$ referenční konstanta a $T [\text{K}]$ je teplota. Vzorec platí pro výpočet odporu nad Curieovou teplotou. Při velkých teplotách v řádech $10^5 - 10^6 \text{ K}$ vzorec ztrácí platnost, jelikož průběh teploty zmenšuje svoji strmost. T_r je potřeba volit podle chemického složení mezi $60 - 200^\circ\text{C}$ ($333 \text{ K} - 473 \text{ K}$) [14].

Monokrystalické senzory se převážně vyrábí z křemíku, typu N. Z důsledku zvyšování teploty polovodiče, pohyblivosti nosičů náboje klesá a odpor narůstá. Pro křemíkový polovodič lze závislost odporu $R_T [\Omega]$ vyjádřit aproximací [14]:

$$R_T = R_r + k\Delta T^2. \quad (11)$$

$R_r [\Omega]$ je odpor při referenční teplotě, $\Delta T [\text{K}]$ rozdíl referenční a výpočetní teploty a $k [\Omega\text{K}^{-2}]$ aproximační konstanta.

Termoelektrický článek pracuje na principu rozdílu teplotní vodivosti dvou různých kovů, mezi nimiž vzniká termoelektrické napětí při rozdílných teplotách horkého a studeného konce. Což demonstruje obr. 8.



Obr. 8: Termoelektrický článku měď - konstantan.

Měřené napětí U_t [V] se zvyšuje se vzrůstajícím rozdílem obou konců podle vztahu [14]:

$$U_t = A + B\Delta T + C\Delta T^2 \text{ [V]}. \quad (12)$$

A, B a C jsou materiálové konstanty použitých kovů. ΔT [K] rozdíl teplot mezi studeným a horkým koncem.

Kritéria pro výběr sondy:

- voděodolnost,
- vývody nejméně 20 cm dlouhé,
- měřicí rozsah minimálně 10°C až 40°C,
- přesnost minimálně 1°C.

Jako optimální se jeví senzor DS18B20 ve voděodolném pouzdře, jehož výstupem je digitální signál.

Tabulka 5: Srovnání teplotních senzorů.

Typ:	Teplotní rozsah [°C]:	Délka vodičů [cm]:	Přesnost [°C]:	Cena [Kč]:
DS18B20	-55 až +125	100	±0,5	38
MJSTS-502-3470-1-600-XH	-30 až +105	60	±1	92
Heraeus W-EYK 6	-40 až +500	28	±1	459

Základní parametry DS18B20 [15] :

- napájecí napětí 3-5,5V,
- teplotní rozsah -55 až +125 °C,
- rozlišení 0,071 °C,
- rychlost převodu 750 ms.



Obr. 9: DS18B20 ve voděodolném pouzdře [19].

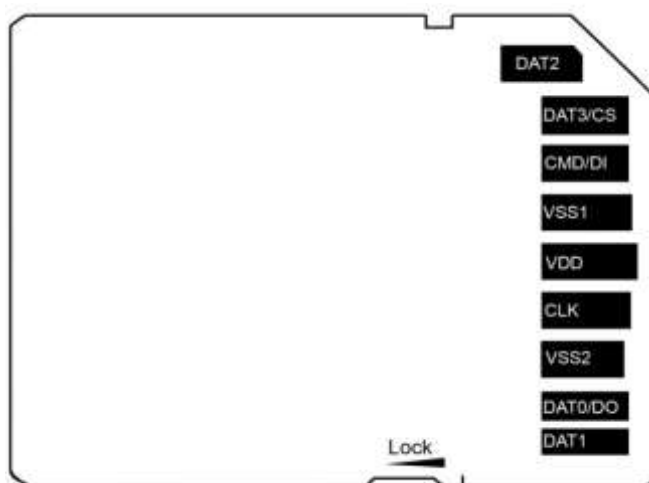
2.2 Datová část

V následujících stranách se práce zabývá nejen ukládáním dat na paměť, v našem případě SD kartu, ale i na zobrazování dat pomocí LCD displeje, což pomůže obsluze při ovládání.

2.2.1 Paměťové úložiště

Z důvodu možnosti měření vzorků mimo dosah PC je do návrhu zakomponována přenositelná paměť, konkrétně SD karta.

SD karta je přenosné zařízení s flash pamětí. Byla navržena jako rychlejší nástupce MMC karet. SD karta má 9 pinů viz obr. 10. 4 piny jsou určeny pro komunikaci přes SPI protokol, piny VSS a VDD jsou napájecí a zbývající 2 DAT1 a DAT2 jsou pro čtyřbitovou komunikaci SD Bus Protokolem. Jelikož většina mikrokontrolérů podporuje komunikaci s SD kartou pomocí SPI módu, bude využit i v návrhu přístroje.



Obr. 10: SD karta s popisem vývodů.



Obr. 11: Slot na SD kartu SDK-9BNS-K13-GS-TB [20].

SPI protokol slouží pro komunikaci dvou a více uzlů. Přičemž jeden hlavní uzel je tzv. řadič sběrnice Master a ostatní jsou typu Slave. Master, jako řídicí prvek generuje hodinový signál (CLK pin), který rozvádí do ostatních uzlů. Tím se stává obousměrný přenos dat zcela synchronním. Pro SD kartu je maximální CLK 25 MHz. Dále jsou tu vodiče DO (Out) a DI (In), které slouží k odesílání a příjmu dat. Poslední důležitým vodičem pro přenos je CS - Chip Select, nebo také SS – Slave Select. Tím Master říká, s jakým zařízením typu Slave naváže komunikaci [18].

Slot pro SD kartu byl vybrán SDK-9BNS-K13-GS-TB od firmy JST díky možnosti objednat jen 1 kus. Byla mu dána přednost před levnějším 104H-TDA0-R, jelikož při zastrkování vydával divný zvuk. V tabulce 6 jsou pro srovnání ceny uvedeny další dvě patice.

Tabulka 6: Srovnání patic pro SD karty.

Typ:	Mechanismus vysouvání:	Cena[Kč]
104H-TDA0-R01	Push-pull	40
107R-AD00-R	Bez mechanismu	60
SDK-9BNS-K13-GS-TB	Push-pull	104

2.2.2 Display

Z důvodu potřeby zobrazování dat, jako jsou názvy složek nebo teploty, je do návrhu zahrnut display. Jako nejlepší se zdá použít alfanumerický LCD display 2x16.

LCD 2x 16 znamená, 2 řádky po 16- ti znacích. Každý znak se skládá z matice 5x 8 pixelů. Aby mikrokontrolér nemusel řídit rozsvícení jednoho každého pixelu, je display osazen řadičem, který obsahuje předdefinovanou znakovou řadu. Display má 3 piny řídicí:

- RS pin - řídí, zda se jedná o data nebo instrukce pro řadič,
- R/W pin - rozlišuje zápis a čtení do LCD,
- E pin - řídí vzorkování řídicích i datových pinů.

a dále piny datové D0-D7 a napájecí V.

Pro zapojení byl vybrán LCD display **RC1602B-GHY-CSXD** viz obr. 12 od firmy Raystars Optronics. Jedná se o alfanumerický display s napájecím napětím 4,5 - 5V. Typ řadiče je ST7066. Při výběru byla hlavním požadavkem cena. Dražší LCD displeje byly větší nebo měli menší hmotnost či jiný typ řadiče.

Tabulka 7: Srovnání LCD 16x2 displayů.

Typ:	Hmotnost [g]:	Rozměry okénka [mm]	Cena [Kč]
RC1602B-GHY-CSXD	40	66 x 16	139
DEM 16216 SGH	20	61 x 15.8	182
PC1602ARU-HWB-G-Q	15	66 x 16,6	193



Obr. 12: LCD display RC1602B-GHY-CSXD [22].

2.3 Řídící část

Řídící část má na starosti obsluhu měření, zpracování dat a odeslání na SD kartu. Menší podkapitolou je klávesnice, kterou je ovládán MCU.

2.3.1 Klávesnice

Klávesnice/ tlačítka fungují na principu ohmického kontaktu, kdy mají 2 možné stavy zapnuto, nebo vypnuto. Mohou mít normální nebo obrácenou logiku. Obrácená logika znamená, že při stisknutí tlačítka se spojí napájecí napětí se zemí, kam následně odečte všechen proud a na pin MCU se objeví logická 0. U mikročipů je obrácená logika tlačítek dosti používaná. Pro účely přístroje byla jako nejlepší vybrána membránová maticová numerická klávesnice za 47 Kč, viz obr. 13.



Obr. 13: Numerická maticová klávesnice [23].

2.3.2 Mikrokontrolér

MCU - jednočipové mikropočítače, jsou „hlavou/ řídicí jednotkou“ velké spousty elektronických přístrojů. Každý mikropočítač se musí skládat z:

- **CPU0** - centrální procesorová jednotka, řídící komunikaci se všemi součástkami systému,
- **ROM** - paměť pro uložení ovládacího softwaru,
- **I/O piny** - pro komunikaci s okolními systémy a součástkami.

Kromě 3 základních prvků je MCU rozšířeno o další potřebné části, jako jsou paměti RAM, oscilátory, řadiče přerušení, časovače, čítače, watchdog, A/D a D/A převodníky,...

Pro komunikaci a přenos dat se svými periferiemi využívá sběrnice s protokoly:

- **RS232** - devíti vodičový asynchronní přenos,
- **SPI** - čtyř vodičová sériová linka pro obousměrný přenos,
- **Microwire** - podobné SPI,
- **I²C** - dvou vodičová sériová linka,
- **CAN, RS489, TTP, UART.**

Výrobou MCU se zabývá široká řada firem, jako jsou: Atmel Corporation, Microchip Technology, Texas Instruments, STMicroelectronics, Freescale Semiconductor. Z důvodu dobré programovatelnosti a zkušeností s těmito kontroléry, bude použit čip PIC od firmy Microchip Technology.

Kritéria pro výběr hlavního MCU:

- 16- ti bitový,
- minimální počet I/O pinů 30,
- SPI bus,

- min. rychlost MCU 8 MIPS.

V tabulce 8 je srovnaných několik kontrolérů. Vybraný byl **PIC24FJ64GA004** viz obr. 14.

Tabulka 8: Srovnání 16- ti bitových PIC kontrolérů.

Typ:	Rychlost [MIPS]:	Počet I/O pinů:	Paměť programu [kB]:	Cena [Kč]:
<u>PIC24F16KM204</u>	16	38	16	90
<u>PIC24FJ64GA004</u>	16	35	64	77
<u>PIC24F32KA304</u>	16	38	32	93
<u>PIC24HJ64GP202</u>	40	21	64	132

Základní parametry PIC24FJ64GA004:

- maximální rychlost 16 MIPS,
- 8 MHz a 32 kHz vnitřní oscilátory,
- 32 kB programovatelná paměť,
- 8,192 B RAM paměť,
- 10- ti bitový ADC,
- 5x16- bit. a 2x32- bitové čítače,
- napájecí napětí 2 - 3,6 V,
- 44 vývodové pouzdro TGFP.



Obr. 14: PIC24FJ64GA004 [24].

2.4 Napájecí část

Kapitola shrnuje napájení celého obvodu stejnosměrným napětím. Do napájení musíme zahrnout přístrojový zesilovač, A/D převodník, senzor teploty, LCD display, SD kartu a MCU. V následující tabulce je přehled rozmezí jednotlivých napětí:

Tabulka 9: Výčet potřebných napájecích napětí.

Součástka:	Napětí [V]:
Přístrojový zesilovač	-15 až -12 a 12 až 15
ADC	5 až 5,5
Teplotní senzor	3 až 5,5
SD karta	2,7 až 3,6
LCD	3,5 až 3,8
LCD logika	4,5 až 5,5
MCU	2 až 3,6

Z tabulky je patrná potřeba nejméně 3 samostatných napájecích napětí. Proto byl vybrán zdroj se třemi napájecími výstupy, buď $\pm 15\text{V}$, nebo $\pm 12\text{V}$ a $+5\text{V}$. 5V bude pomocí rezistorů dále zmenšeno na požadované napětí. Za výstupy z napájecího napětí byly dány ještě $10\text{ }\mu\text{F}$ kondenzátory, aby zmenšili šum z napájení. Na trhu se nejlevnější 3 výstupové AC/DC měniče pohybují okolo 1000 Kč. A dá se říci, že jsou srovnatelné. Byl vybrán zdroj **ECL15UT03-T** obr. 15, z důvodu nejmenšího proudového odběru z 5- ti voltového výstupu a dostupnosti v tabulce 10 je vidět srovnání. 1. napájecí napětí měly všechny 3 zdroje 5 V a výstupní šum měly také stejný.

Tabulka 10: Srovnání napájecích zdrojů.

Typ:	$\pm U$ [V]:	Minimální proudový odběr 5V [mA]:	Cena [Kč]:
TOP 60522	12	500	1038
LPT23	12	400	898
ECL15UT03-T	15	200	974



Obr. 15: Napájecí tří - výstupový zdroj ECL15UT03-T [26].

3 REALIZACE PŘÍSTROJE

V této kapitole se zabývá samotnou realizací přístroje. A to jak hardwarovým, tak softwarovým řešením.

3.1 Senzor měření hmotnosti

3.1.1 Snímač hmotnosti

V první fázi bylo potřeba zjistit **rozlišení senzoru**. Pomocí přístrojového zesilovače INA 125 bylo změřeno rozlišení snímače. Přístroj INA 125 byl zatížen rezistorem $R_g = 60 \Omega$. Zesílení je 1004 podle vzorce 14.

$$G = 4 + \frac{60k\Omega}{R_g} = 4 + \frac{60000}{60} = 1004 \quad (14)$$

Na senzor bylo přivedeno referenční napětí 10 V. Hmotnosti prvků byly měřeny váhou, s přesností 0,01 g a napětí měřeno multimetrem UNI-T UT50C. Měření nemělo kvalitativní význam. Mělo jen zjistit rozlišení, viz tabulka 11.

Tabulka 11: Rozlišení snímače při vstupním napětí 10 V a zesílením výstupního napětí 1004.

m [g]	U_0 [mV]	U [mV]	ΔU [mV]	X_v [mV/g]
2,52	-531	-474	57	22,62
28,58	-531	116	647	22,64
35,01	-531	261	792	22,62
197,87	-531	3900	4431	22,39

Z výsledků je patrné, že měření bude stabilní v řádech desetin gramů. V řádech setin gramů, jde vidět mírná odchylka, která ale může být způsobena chybami měření. U poslední měřené hodnoty 197,81 g byl o rozlišení významně jiný. To lze připisovat většímu měřicímu rozsahu multimetru. Rozdíl napětí ΔU [mV] byl vypočítán pomocí vzorce:

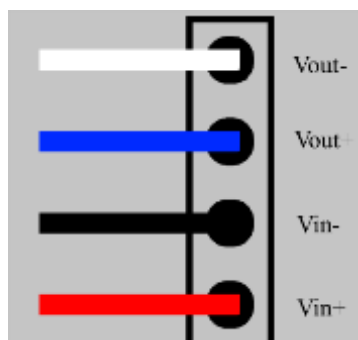
$$\Delta U = U - U_0 \text{ [mV]} \quad (15)$$

Kde V [mV] je hodnota napětí po zatížení senzoru a V_0 [mV] je hodnota napětí nezatíženého senzoru.

Rozlišení X_v [mV/g] se následně vypočítá, jako podíl hmotnosti tělesa m [g] a rozdílu napětí. :

$$X_v = \frac{m \cdot \Delta U}{\Delta U} \text{ [mV/g]} \quad (16)$$

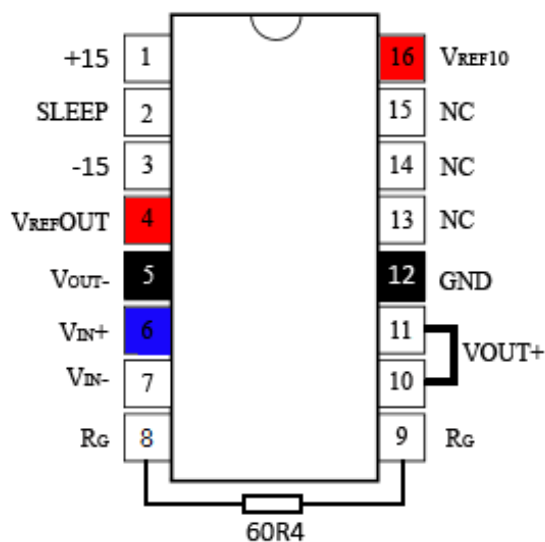
Záporné napětí U_0 umožňuje minimalizovat vliv váhy misky. Senzor vyhovuje pro hmotnost vzorku do 200 g, kdy na výstupu operačního zesilovače dosáhneme maximálního výstupního napětí okolo 4,5 V. Zapojení snímače ukazuje obr. 16.



Obr. 16: Zapojení kontaktů tenzometrického snímače.

3.1.2 Operační zesilovač INA125

V předchozí kapitole byl změřený snímač s optimálním zapojením, které bude využito pro návrh přístroje. Tedy referenční napětí přivedené na vstup snímače 10 V. A zatěžovací rezistor $60,4 \Omega$. Zapojení přístrojového zesilovače do obvodu znázorňuje obr. 17.

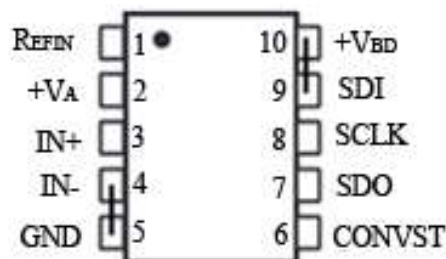


Obr. 17: Zapojení zesilovače INA125 [11].

Na barevně označené piny je napojen snímač, pin V_{IN-} je připojen na bílý vodič snímače. NC piny zůstanou nezapojeny. Pin SLEEP je připojen k MCU a přepíná se jím mezi aktivním a sleep režimem. Mezi zemí a napájecími piny jsou zapojeny $0,1 \mu F$ kondenzátory pro odstranění šumu z napájení.

3.1.3 A/D převodník

Obr. 18 znázorňuje zapojení převodníku ADS8319IDGST do obvodu. Referenční napětí je přivedeno ze sériové napěťové reference. Mezi referenční napětí a zemí jsou zapojeny dva kondenzátory 0,1 μ F a 10 μ F. Kondenzátor 0,1 μ F by měl být vůči zemi i na obou napájecích napětích. Protože na napájecím napětí pro analogovou část +VA je nedaleko stejný kondenzátor na napěťové referenci, nebude již přidáván i před převodník. Kondenzátor bude na napětí pro digitální část +VBD. S +VBD je spojen pin SDI, jelikož pro komunikaci není potřebný. Pin pro záporný vstup IN- bude připojen na zem, protože záporný výstup z operačního zesilovače, je také připojen k zemi [13].



Obr. 18: Zapojení zesilovače ADS8319IDGST [13].

Komunikace mezi MCU a převodníkem může probíhat čtyř nebo tří vodičově. V rámci ušetření pinů bylo rozhodnuto použít jen tři vodiče. Pro příjem dat MCU posílá do převodníku přes CLK pin hodinový signál. CNV nastaví na nulu a čeká, až se na pinu SDO objeví logická 0, což značí, že převodník má hodnotu převedenou a začne odesílat 16- ti bitovou hodnotu převodu.

Pro zjištění konečné váhy byla vytvořena knihovna WEIGHT.h, která obsahuje funkce:

Inicializační:

- `WEIGHTinit` pro nastavení pinů a inicializaci prvního převodu, který je chybný. Volá funkci `WEIGHTzero`.

Kalibrační:

- `WEIGHTzero` vrací hodnotu napětí při sleep režimu přístrojového zesilovače. Tedy tzv. signál pozadí,
- `WEIGHTwet_calibration` přiřadí známé hodnotě objemu kalibračního tělesa naměřené napětí,
- `WEIGHTair_calibration` přiřadí známé hodnotě objemu kalibračního tělesa naměřené napětí.

Funkce pro zjištění napětí

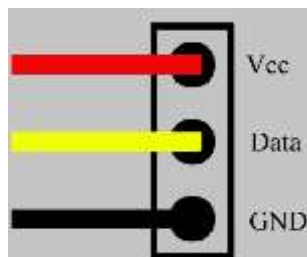
- `WEIGHT` čeká, až se váha ustálí, naměří 101 po sobě jdoucích hodnot napětí a vrátí střední hodnotu,
- `WEIGHTfinish` vrací rozdíl napětí volných misek a misek se vzorkem.

Konečný výstup

- `WRITE_weight_volume` vrátí změřený objem vypočítaný z kalibračního napětí,
- `WRITE_weight` vrátí změřenou hmotnost vypočítanou z kalibračního napětí.

3.2 Teplotní senzor

Znalost teploty vody při měření, slouží spíše k informativním účelům. Teplota by se během měření měla měnit jen velice mírně. Tedy teploměr je kontrolován mikrokontrolérem jen na začátku a dále s velkým časovým odstupem během měření. Senzor má 3 vodiče, jejich zapojení viz obr. 19. Napájení vodičem Vcc je stejné jako napájení MCU.



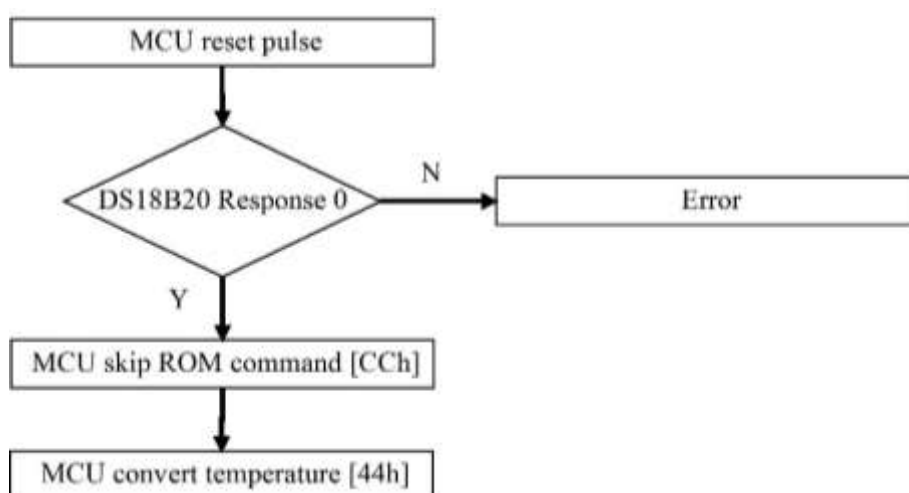
Obr. 19: Zapojení pinů senzoru DS18B20.

Komunikace mezi mikročipem a senzorem probíhá obousměrně pomocí vodiče Data tzv. 1-Wire protokolem. Pro potřeby tohoto protokolu je mezi pin Data a Vcc přidán pull up rezistor o hodnotě 4,5 k Ω . Ten zajišťuje v případě uvolnění komunikační linky na datovém vodiči logickou 1 [13]. O zápis a čtení logických úrovní se starají funkce v knihovně TEMPR.h :

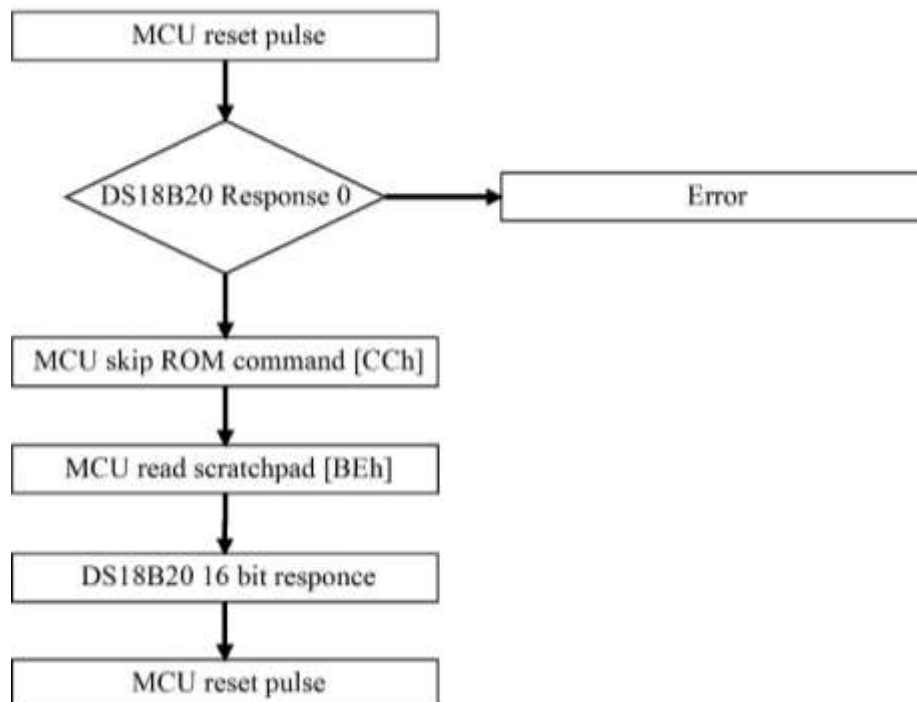
Zápis do senzoru

- logická 1: Po dobu 1 μ s je linka držena v log. 0, následně 60 μ s uvolněna,
- logická 1: Po dobu 60 μ s je držena log. 0, poté linka 2 μ s uvolněna.

Čtení ze senzoru probíhá tak, že MCU 2 μ s podrží linku v log. 0, pak linku uvolní a po osmi mikrosekundách přečte logickou hodnotu. Pro získání teploty je zapotřebí odeslání dvou procedur. Pro konverzi- obr. 20 a následně pro přečtení hodnoty viz obr. 21.



Obr. 20: Diagram procedury pro konverzi teploty mezi MCU a DS18B20.



Obr. 21: Diagram procedury pro čtení teploty mezi MCU a DS18B20.

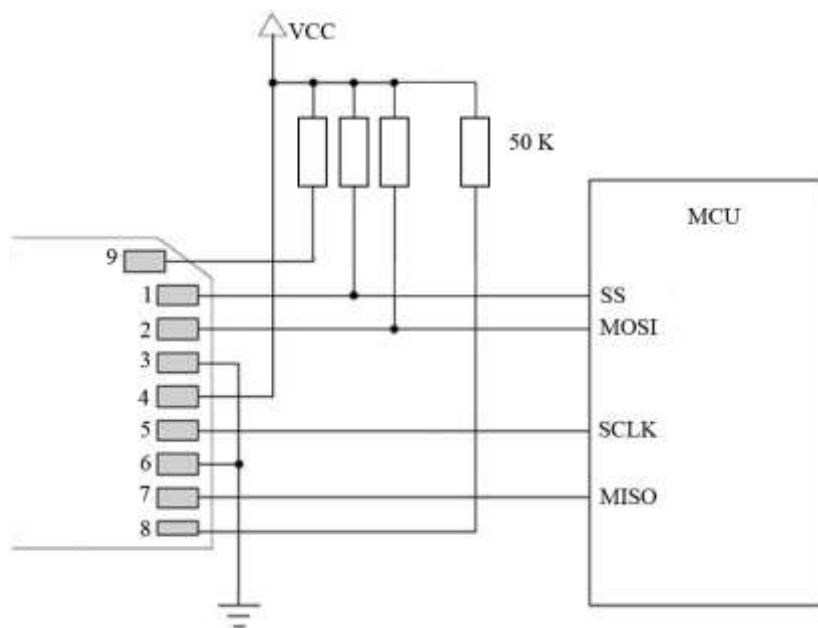
Při resetovacím pulzu mikrokontrolér nastaví na portu log. 0 po dobu 480 μ s, následně port uvolní a čeká odpověď v podobě log. 0 od senzoru. Znázorněné procedury jsou nejjednodušším a nejrychlejším způsobem získání dat ze senzoru. Ale jelikož není přijat kontrolní součet, může v nějakých případech být přenos špatný. Což je samozřejmě akceptovatelné pro orientační zjištění teploty.

Knihovna TEMPR.h pro získání teploty obsahuje tyto funkce:

- `TEMPRReset` odešle restartovací pulz a přijme odpověď od senzoru,
- `TEMPRWrite` zapisuje data do senzoru,
- `TEMPRInit` spouští obě procedury,
- `WRITE_tempr` vrátí změřenou teplotu.

SD karta

Karta je nejsložitější prvek návrhu. Obr. 22 znázorňuje zapojení pro komunikaci přes SPI protokol. Opět jsou na vstupech použity pull-up rezistory, ale tentokrát pro zabezpečení zápisu na kartu.



Obr. 22: Zapojení SD karty pro komunikaci SPI protokolem [27].

Pro **komunikaci po SPI** je nutné, aby z MCU byl odeslán hodinový signál a pin SS byl v log. 0. Následně pomocí pinů MOSI (odesílání dat do SD karty) a MISO (přijímání dat z SD karty) prvky komunikují mezi sebou. Mikročip řídí kartu pomocí příkazových rámců.

Příkazový rámec má 6 bytů:

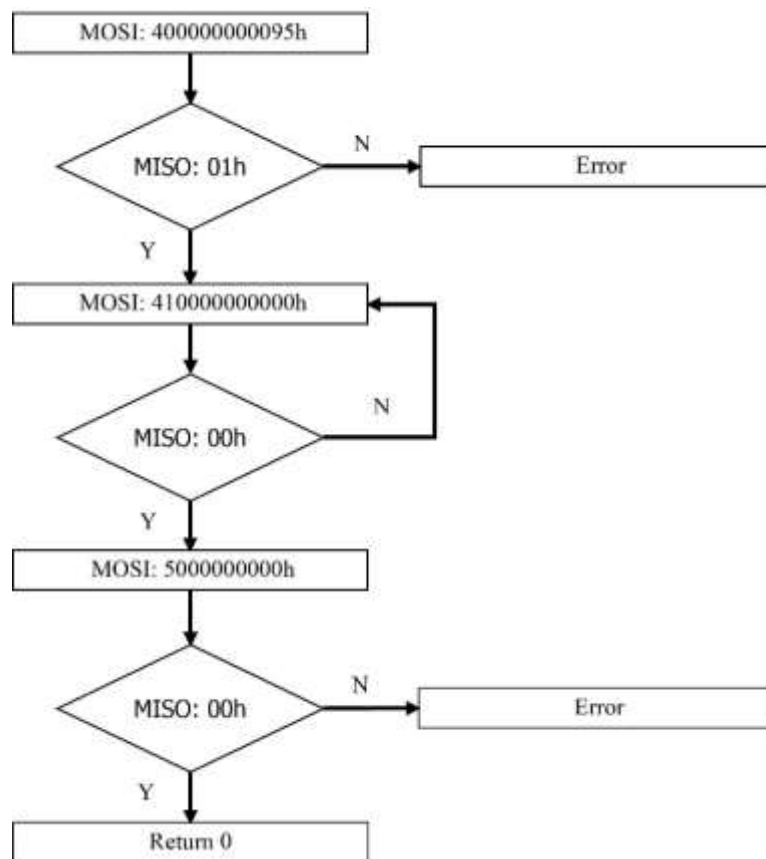
- 1. byte je číslo příkazu přičtené k hodnotě 40h (CMD 1 je tedy 41h),
- 2.- 5. byte značí hodnotu příkazu,
- 6. byte je kontrolní součet CRC. Pro SPI nemá žádný význam.

Pro naši aplikaci postačí 5 základních příkazů CMD 0, CMD 1, CMD 16, CMD 17, CMD 24. Na každý z těchto pěti příkazů je odpovězeno 1 bytovým response tokenem, který odesílá v případě chyby nenulovou odpověď. V případě že odešle 1, říká, že je ve stavu Idle.

- **CMD0** je resetovací příkaz, u kterého 2.- 5. byte je nulový, 6. byte má hodnotu 95h, jediný příkaz, kde záleží na kontrolním součtu. Response token musí mít hodnotu 1 „Idle state“.
- **CMD1** nastavuje SPI mód na kartě. 2.- 5. byte je opět nulový. Odpověď by měla být 0, v případě, že je odpověď 1, se karta ještě nenastavila a je nutné CMD1 opakovat do doby než bude odpověď 0.
- **CMD16** nastaví velikost odesílaného a přijatého bloku. Kromě 4. bytu, kde je hodnota 02h (nastavení bloku na velikost 512), je hodnota příkazu nulová. Opět se očekává v response tokenu 0.
- **CMD 17** je příkaz pro čtení. Hodnotou příkazu je adresa rámce, který má být přečtený. V případě správně zadaného příkazu karta odpoví nulovým response token. Za ním byty FFh. Karta následně odešle start byte FEh a začne odesílat 512 bytů dat.

- **CMD 24** zapisujeme data na kartu. Hodnotou příkazu je opět adresa, ale rámce pro zápis dat. Jestli-že je response token 0, MCU odešle start byte FEh a následně 512 bytů dat. Karta poté odesílá informaci, zda je zaneprázdněná.

Obr. 23 znázorňuje diagram inicializační funkce, napsané pro tuhle aplikaci.



Obr. 23: Diagram inicializace SD karty z knihovny SPI_SD.h

Přístroj je navrhnut pro SD kartu se souborovým systémem FAT 16. Tento systém je rozdělen do několika bloků Master Boot Record, Boot Record, rezervované bloky, Kořenového adresáře, dvakrát Fat Tabulka a Datové oblasti.

Master Boot Record (MBR) je na adrese 00000000h a měl by obsahovat na prvních 446 bytech zaváděcí kód a v následujících 64 bytech informace o 4 patrition tabulkách. Poslední 2 byty 55h a AAh. V tomto se shoduje mnoho autorů. Pro příklad z bakalářských prací: Záznamové zařízení pro železniční přejezdy [28] a Záznamník událostí v reálném čase [29]. Faktem ale zůstává, že patrition tabulky a jiné informace z MBR na nulové adrese nebývají, obvykle bývá MBR přepsaný Boot Sectorem (ověřeno na čtyřech různých SD kartách) viz obr. 24.

Offset	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
000000016	02	00	02	00	00	F8	F5	00	3F	00	FF	00	00	00	00	00	ø ? ý
000000032	00	D4	03	00	80	00	29	73	2D	90	D6	4E	4F	20	4E	41	ô €)s- ÖNO NA
000000048	4D	45	20	20	20	20	46	41	54	31	36	20	20	20	33	C9	ME FAT16 3E
000000064	8E	D1	BC	F0	7B	8E	D9	B8	00	20	8E	C0	FC	BD	00	7C	ŽŇ+5{ŽÜ, ŽÄu;
000000080	38	4E	24	7D	24	8B	C1	99	E8	3C	01	72	1C	83	EB	3A	8NS)S<Ä"è< r fè:
000000096	66	A1	1C	7C	26	66	3B	07	26	8A	57	FC	75	06	80	CA	f; &f; &ŠWuu €E
000000112	02	88	56	02	80	C3	10	73	EB	33	C9	8A	46	10	98	F7	^v €Ä se3EŠF ±E
000000128	66	16	03	46	1C	13	56	1E	03	46	0E	13	D1	8B	76	11	f F V F Ñ<v
000000144	60	89	46	FC	89	56	FE	B8	20	00	F7	E6	8B	5E	0B	03	`%Fü%Vp, ÷æ< ^
000000160	C3	48	F7	F3	01	46	FC	11	4E	FE	61	BF	00	00	E8	E6	ÄH÷ó Fû Npa; èæ
000000176	00	72	39	26	38	2D	74	17	60	B1	0B	BE	A1	7D	F3	A6	r9æ8-t `± %; }ó;
000000192	61	74	32	4E	74	09	83	C7	20	3B	FB	72	E6	EB	DC	A0	at2Nt fÇ ;ûræëÜ
000000208	FB	7D	B4	7D	8B	F0	AC	98	40	74	0C	48	74	13	B4	0E	û)' }<8-~@t Ht '
000000224	BB	07	00	CD	10	EB	EF	A0	FD	7D	EB	E6	A0	FC	7D	EB	» Í ël ýléæ ü}è
000000240	E1	CD	16	CD	19	26	8B	55	1A	52	B0	01	BB	00	00	E8	ái Í &<U R° » è
000000256	3B	00	72	E8	5B	8A	56	24	BE	0B	7C	8B	FC	C7	46	F0	; rè[ŠV\$% <üÇFø
000000272	3D	7D	C7	46	F4	29	7D	8C	D9	89	4E	F2	89	4E	F6	C6	=)ÇFó)}GÜ:NòkNòE
000000288	06	96	7D	CB	EA	03	00	00	20	0F	B6	C8	66	8B	46	F8	-)Èè QÈf<Fø
000000304	66	03	46	1C	66	8B	D0	66	C1	EA	10	EB	5E	0F	B6	C8	f F f<ðfÄè è^ QÈ
000000320	4A	4A	8A	46	0D	32	E4	F7	E2	03	46	FC	13	56	FE	EB	JÜŠF 2ä÷ä Fû Vpè
000000336	4A	52	50	06	53	6A	01	6A	10	91	8B	46	18	96	92	33	JRP S; j ' <F -'3
000000352	D2	F7	F6	91	F7	F6	42	87	CA	F7	76	1A	8A	F2	8A	E8	Ö÷ó'÷óB÷E÷v ŠöŠè
000000368	C0	CC	02	0A	CC	B8	01	02	80	7E	02	0E	75	04	B4	42	Äl Î, €~ u 'B
000000384	8B	F4	8A	56	24	CD	13	61	61	72	0B	40	75	01	42	03	<öŠV\$Í aar @u B
000000400	5E	0B	49	75	06	F8	C3	41	BB	00	00	60	66	6A	00	EB	^ Iu øÄA» `fj è
000000416	B0	42	4F	4F	54	4D	47	52	20	20	20	20	0D	0A	4F	64	°BOCTMGR Od
000000432	65	62	72	61	74	20	64	69	73	6B	79	20	9F	69	20	6A	ebrat disky Yi j
000000448	69	6E	A0	20	6D	82	64	69	61	FF	0D	0A	43	68	79	62	in m,diaý Chyb
000000464	61	20	64	69	73	6B	75	FF	0D	0A	52	65	73	74	61	72	a diskuý Restar
000000480	74	75	6A	74	65	20	6C	69	62	2E	20	6B	6C	A0	76	65	tujte lib. kl ve
000000496	73	6F	75	2F	0D	0A	00	00	00	00	00	AC	CA	D8	55	AA	sou. -ÈØU*

Obr. 24: Zobrazení Master Boot Record se zvýrazněným místem pro partition tabulky.

Boot Sector (BS) nebo také partition obsahuje důležitá data o rozdělení karty tzv. BIOS parametry. Obvykle se u SD karet nachází v MBR. Pokud se tam nenachází, nachází se na adrese uložené v MBR. Pro uložení dat z Boot Sectoru je v knihovně SPI_SD.h vytvořena funkce SDinfo. A zapamatovává si tyto informace pod názvy:

- `byt_sector`: počet bytů na sektor: 11. a 12. byte,
- `sector_cluster`: počet sektorů na cluster: 13. byte,
- `reserv_sector`: počet rezervovaných sektorů: 14. a 15. byte,
- `fat`: počet Fat tabulek: 17. byte,
- `root_entires`: počet bloků Root adresáře: 18. a 19. byte,
- `sector_fat`: počet sektorů na FAT tabulku: 22. byte.

Z těchto údajů lze následně vypočíst adresa Fat adresáře, Root adresáře a prvního sektoru dat.

Root adresář obsahuje informace o uložených souborech na kartě. Každý uložený soubor má 32 bytový zápis, viz obr. 25. (vpravo za čarou je překlad do Ascii). Prvních 7 bytů obsahuje název souboru. Další 3 byty koncovku souboru. Následuje 1 byte určující druh souboru (pro TXT je to 20h). Pro přístroj jsou ještě důležité byty na 27. a 28. místě, ty obsahují hodnotu prvního clusteru souboru nebo adresáře ve Fat tabulce. A od 29. do 32. místa je zapsaná velikost souboru.

0003D000	53 4F 55 42 4F 52 20 20 54 58 54 20 10 9C 70 B4	SOUBOR	TXT	αp'
0003D010	B1 48 B1 48 00 00 71 B4 B1 48 02 00 10 00 00 00	±H±H	q'±H	

Obr. 25: Ukázka zápisu souboru v Root adresáři.

Adresu kořenového adresáře lze vypočítat z Bios parametrů následovně:

$$root_adr = byt_sector * (sector_fat * fat + reserv_sector) \quad (15)$$

Fat tabulka mapuje použité clustery v datové oblasti. Každý cluster je tu zastoupen dvěma byty. Jsou-li byty nulové, značí to, prázdný cluster. Mají-li hodnotu 0002h – FFEFh, odkazují na následující cluster dat stejného souboru. A vyšší než FFEFh značí plný cluster. Na obr. 26 je ukázka začátku Fat tabulky. První (nultý) zápis je vždy rezervovaný a má hodnotu FFF8h. Modře vyznačený je jeden soubor, o velikosti 3 clustery.

00000C00	F8 FF FF FF 03 00 04 00 FF FF 06 00 07 00 FF FF
00000C10	09 00 0A 00 FF FF 0C 00 0D 00 FF FF 00 00 00 00

Obr. 26: Ukázka Fat tabulka s pěti soubory.

Adresa fat tabulky se vypočítá následovně:

$$fat_adr = byt_sector * reserv_sector \quad (16)$$

Datová oblast je rozdělena na clustery. Každý cluster obsahuje ještě sektory, tedy řekněme sub bloky, o velikosti obvykle 512 bytů, kam se zapisují znaky. Výpočet adresy prvního clusteru na kartě:

$$dat_adr = root_adr + root_entires * 32 \quad (17)$$

Data jsou na SD kartu přístrojem ukládána, jako TXT soubor. Grafická forma souboru je kompatibilní s tabulkovými programy, tedy výstupem je tabulka s hodnotami. Tabulka se tvoří pomocí 3 bytů. Při zápisu dat do dalšího sloupce se zapíše před data 09h. Pro zápis dat na další řádek je nutné před data vložit sekvenci 0Dh 0Ah. V kombinaci s mezerami (20h) lze vytvořit vizuálně kvalitní formu dat.

Pro zápis a čtení dat je vytvořena knihovna SPI_SD.h, ve které je mnoho funkcí. Ty nejdůležitější jsou:

Inicializační:

- `SDinit` pro nastavení pinů, inicializaci SPI v MCU i na kartě. Dále zjišťuje a ukládá z BR parametry.

Komunikační:

- `SDcommand` odesílá příkazové rámce,
- `SDread` přečte jeden blok dat,
- `SDwrite` zapíše jedno blok dat.

Pro Root adresář

- `SDfind_file` pohyb v Root adresáři, čtení a zapisování informací o souborech.

Pro Fat tabulku

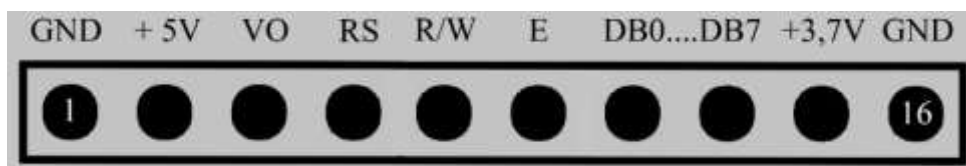
- `SDfind_cluster` hledá první nebo následující cluster, v případě nalezení posledního clusteru volá funkci `SDfree_cluster`,
- `SDfree_cluster` prohledává Fat a hledá volný cluster, který zaplní a vymaže data v tomto clusteru.

Pro datovou část

- `SDnew_file` vytvoří nový soubor,
- `SDnext_sample` přejde, případně vytvoří další vzorek,
- `SDmove_block` vloží data do určité části souboru a předešlá data posune,
- `SDwrite_data` upraví příchozí data a odešle do `SDmove_block`.

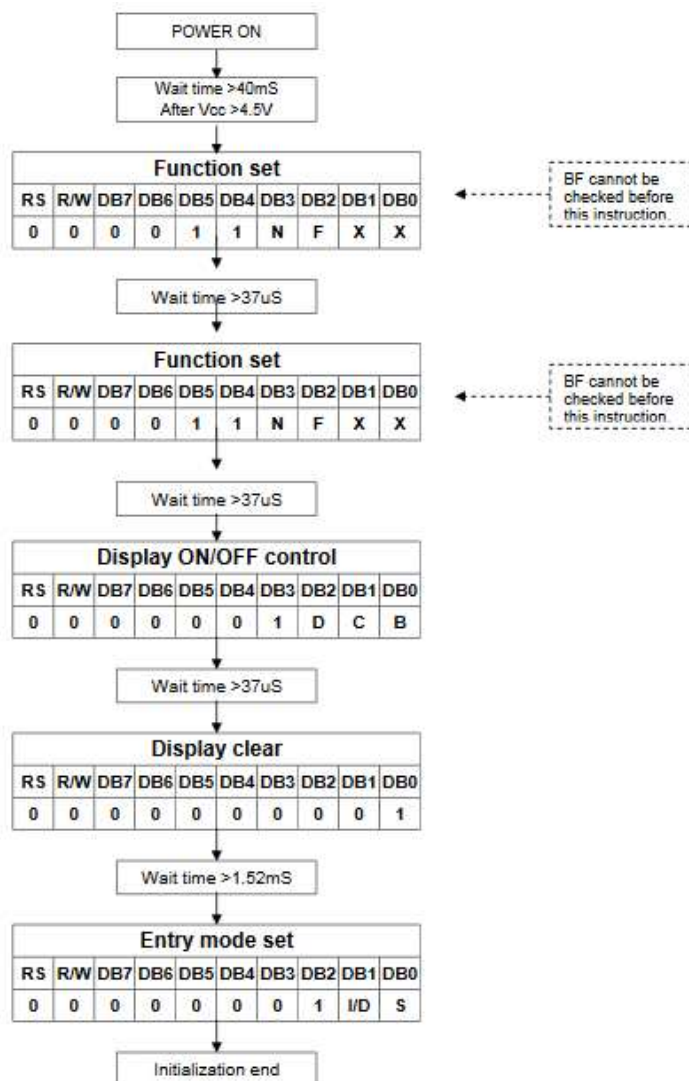
3.3 LCD display

Display je důležitou částí návrhu, jelikož pomáhá při ovládání přístroje a provádí vizualizaci pokynů. Obr. 27 ukazuje zapojení pinů. Pin VO je přes rezistor 5,6 kΩ zapojen do země a vytváří kontrast displeje. Napětí 5 V napájí logickou část displeje a 3,7 V část analogovou.



Obr. 27: Rozložení pinů LCD displeje.

Komunikace probíhá po řídicích vodičích RS, R/W, E a po datových vodičích DB0 až DB7. Inicializace LCD s driverem ST7066U probíhá podle diagramu na obr. 28.



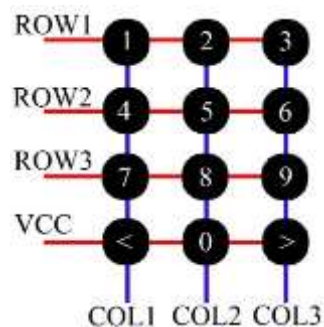
Obr. 28: Inicializace driveru ST7066U [30].

Pro LCD jsou v knihovně LCD.h vytvořeny tyto základní funkce:

- `LCDinit` pro nastavení pinů, a inicializace dle diagramu na obr. 28,
- `LCDwrite` se stará o zápis do RAM paměti,
- `LCDcursor` zajišťuje pohyb kurzoru.

3.4 Klávesnice

Princip zapojení maticové membránové klávesnice viz obr. 29. Mezi zemí a piny, připojené jako vstupy do MCU označené v knihovně KEYBOARD.h jako COL, jsou zapojeny 10 k Ω pull down rezistory. ROW jsou výstupní piny z MCU. V rámci šetření pinů bylo rozhodnuto dát do 4. řádku místo pinu z MCU napájecí napětí mikrokontroléru.



Obr. 29: Uspořádání pinů maticové klávesnice.

3.5 Mechanické části a krytování

Krabička z důvodu bezpečnosti byla umístěna na podstavec. Je navržena, aby se do ní nemohlo dostat vlhko z mokrých prstů. Vážící misky jsou z plastu a hliníkového drátu, pro minimalizaci zátěže. V misce na vodu je umístěn po stranách molitan pro zklidnění vodní hladiny. Ten je odnímatelný, z důvodu nutného vysoušení. Všechny kovové části přístroje jsou kvůli bezpečnosti uzemněny. Dizajn přístroje na obr. 30.



Obr. 30: Dizajn přístroje.

4 TESTOVÁNÍ

Kapitola je zaměřená na kalibraci přístroje, popis ovládání přístroje, ukázkou zkušebního měření.

4.1 Kalibrace

Kalibrace přístroje se provádí vždy na začátku série měření z důvodu zvýšení přesnosti a hlavně kvůli vodě, která působí vztlakovou silou i na misky. A tedy je zapotřebí kalibrovat senzor. To se porovnává pomocí kalibračního tělesa. Objem a hmotnost kalibračního tělesa se zadávají v úvodním menu.

4.2 Ovládání přístroje

Zařízení má jednoduché menu, které se ovládá jak tlačítky, tak šipkami (* je šipka < a # je doprava >). V menu jde volit mezi jednotlivými módy. Ty umožňují změřit absolutní nasákavost a hustotu keramiky (potřeba souboru na kartě s předešlými hodnotami), postupné časové vážení nebo jen zvážení hmotnosti či zjišťování hustoty bez nutnosti ukládání na SD kartu. Na konci menu je pomocí tlačítka 0 možný vstup k samotnému měření. To probíhá poloautomaticky. Měření je jednoduché. Na display se zobrazí, co má obsluha provádět. Volno znamená, že v miskách nemá být žádný vzorek. Vzduch znamená, že vzorek má být umístěn do horní (suché) misky. A voda znamená, že má být vzorek umístěn do misky ponořené ve vodě. V případě potřeby přeskočit vzorek nebo úplně zrušit měření. Stačí na klávesnici stisknout tlačítko 0 a v nabídce vybrat možnost, která vyhovuje. Měření se nepřerušuje jen ve chvíli, kdy jsou nahrávána data z měření na kartu, což je mezi jednotlivými vzorky. Ve chvíli, kdy je jeden vzorek doměřen a druhý vzorek ještě není zobrazen na displeji. Stačí tedy počkat na zobrazení následujícího vzorku a měřicí program ukončit.

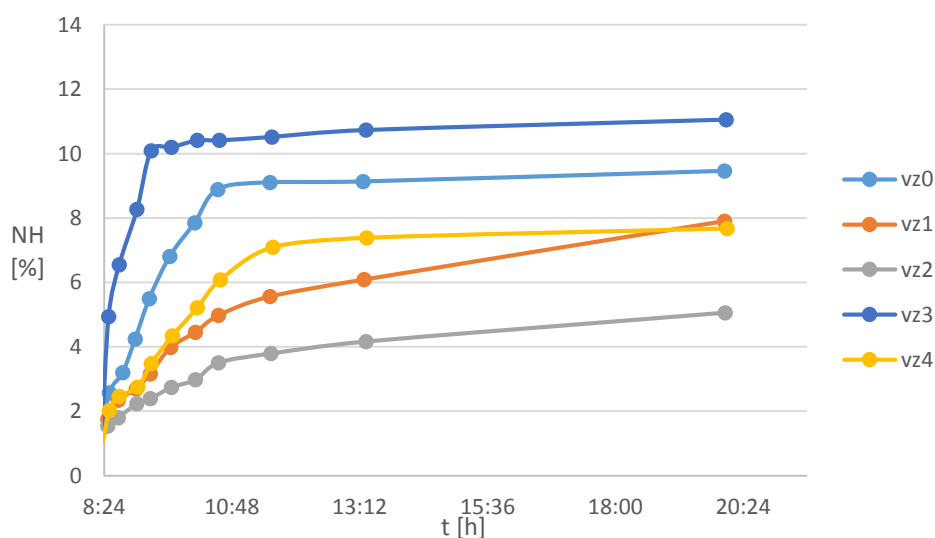
4.3 Zkušební měření

Jako zkouška funkce přístroje bylo uděláno zkušební měření s 5- ti vzorky keramiky z třech různých období (doba bronzová, halštatská a doba římská). V tabulce 13 jde vidět upravená podoba dat z přístroje pod vz0-999 je váha v gramech a vedle reálný čas. 4. řádek od spodu s nulovými hodnotami času je naměřená absolutní nasákavost a na posledním řádku je hustota keramiky, měřená zároveň s absolutní nasákavostí.

Tabulka 12: Zkušební měření přístrojem.

29.5.										
	vz0		vz1		vz2		vz3		vz4	
	36,58	8:20	17,09	8:20	45,67	8:21	9,32	8:21	6,91	8:22
	37,52	8:30	17,39	8:28	46,37	8:28	9,78	8:29	7,05	8:30
	37,75	8:45	17,49	8:40	46,49	8:40	9,93	8:41	7,08	8:41
	38,13	8:59	17,55	9:00	46,69	9:01	10,09	9:01	7,1	9:02
	38,59	9:15	17,63	9:16	46,76	9:16	10,26	9:17	7,15	9:17
	39,07	9:38	17,77	9:39	46,92	9:40	10,27	9:40	7,21	9:41
	39,45	10:06	17,85	10:07	47,03	10:07	10,29	10:09	7,27	10:09
	39,83	10:32	17,94	10:33	47,27	10:33	10,29	10:34	7,33	10:35
	39,91	11:31	18,04	11:31	47,4	11:32	10,3	11:33	7,4	11:34
	39,92	13:16	18,13	13:17	47,57	13:19	10,32	13:19	7,42	13:20
	40,04	20:03	18,44	20:03	47,98	20:04	10,35	20:05	7,44	20:06
	40,34	0:00	18,64	0:00	48,27	0:00	10,45	0:00	7,5	0:00
	2,241	0:00	2,236	0:00	2,423	0:00	2,231	0:00	2,467	0:00

Z tabulky následně lze přepočtem podle vzorce 1 získat graf časové nasákavosti keramiky viz obr. 31.



Obr. 31: Graf časové nasákavosti keramických vzorů.

V úvodu měření nasákavost prudce stoupá, voda vyplňuje póry a trhliny a v druhé fázi graf pozvolna roste a limituje k absolutní nasákavosti. Každá keramika má svůj vlastní průběh nasákavosti. Pro samotné měření je důležité zaznamenat přechod z první skokové fáze do fáze limitní a následně změřit strmost stoupání v limitní části.

Tak dostaneme představu o celém průběhu nasáknutí keramických vzorků. Měření by se tedy mělo provádět první 3 hodiny vždy v půlhodinových intervalech a následně maximálně po 5 hodinách měřit nejméně po dobu 16 hodin. Dostaneme tak představu o celém průběhu. Za předpokladu stoupání křivky v limitní části, můžeme vypočíst strmost limitního průběhu:

$$ST = \frac{\Delta NH}{\Delta t} [\%/h] . \quad (18)$$

Vzorec strmosti ST vyjadřuje změnu nasákavosti ΔNH [%] za časový úsek Δt [h]. Spojíme-li postupné měření resp. strmost limitní části ST [%/h] s absolutním nasáknutím NH_{abs} [%], můžeme vypočíst teoretickou dobu absolutního nasáknutí:

$$t_{abs} = t + \frac{NH_{abs} - NH}{ST} [h], \quad (19)$$

t [h] značí dobu, při které je zjištěna nasákavost NH [%] v limitní části.

4.3.1 Druh vody

V knize technologie keramiky [2] se uvádí, že voda by měla být destilovaná. Což samozřejmě mírně zvyšuje nákladnost, buď na koupi, nebo jedná-li se odpadní vodu z nějakého provozu, tak na logistiku. Výhodou destilované vody může být její čistota a teplota, kdy voda z kohoutku se musí nechat ustálit na pokojovou teplotu, ale voda destilovaná, obvykle uchovávaná v nějakém barelu již pokojovou teplotu mít může. Rozdíl mezi vodou destilovanou a vodou kohoutkovou je v hustotě. Po sečtení limitních hodnot podle vyhlášky č. 252/2004 sb. se hustota zvýší maximálně o $0,0004 \text{ gcm}^{-3}$. Tedy hustota by měla ovlivnit měření méně, než například teplota vody. Problémem by mohly být tvořící se usazeniny z kohoutkové vody ve vzorcích, ale vezmeme-li v potaz, že vzorky ležely nejméně 100 roků v zemi, obvykle na polích, kde docházelo jistě k absorpci množství látek, ať již ze země nebo chemických postřiků, jde označit použití kohoutkové vody jako faktor mírně ovlivňující keramické vzorky. Prvotní měření ukázalo, že toto tvrzení by mohlo být správné. Byly provedeny dvě stejné měření absolutního nasáknutí na identických vzorcích. První měření bylo provedeno s vodou destilovanou, druhé měření s vodou kohoutkovou. Výsledky měření jsou shrnuty do tabulky 13. Voda byla stočena z vodovodu Velké Opatovice vedená, jako tvrdá, dle Vodárenské akciové společnosti je průměrná tvrdost vody v tomto vodovodu $2,75 \text{ mmol/l}$ [3].

Tabulka 13: Závislost nasákavosti keramiky na druhu vody.

	1. měření: destilovaná voda			2. měření: kohoutková voda			
Vzorky	ms [g]	mv [g]	NH [%]	ms [g]	mv [g]	NH [%]	ΔNH [%]
1	27,54	30,26	9,88	27,69	30,35	9,61	0,27
2	10,18	11,22	10,22	10,16	11,18	10,04	0,18
3	9,53	11,01	15,53	9,52	10,98	15,34	0,19
4	44,72	51,62	15,43	44,67	51,54	15,38	0,05

V tabulce můžeme vidět, že rozdíl nasákavosti ΔNH [%] byl na měřených vzorcích méně než 0,3 %. Což je velmi příznivé. U ostatních měření se rozdíl pohyboval do 1 %. Rozdíl v nasákavostech může být způsoben neúplným vysoušením vzorku, to lze vidět na 1. vzorku, kdy při 2. měření je hmotnost suchého střepu větší než při prvním měření, nebo mírnou ztrátou hmotnosti, z důvodu vyplavení nečistot, či materiálu samotného vzorku nebo z důvodu mírného otření vrchní vrstvy.

5 ZÁVĚR

Hlavním cílem práce byl návrh a sestavení přístroje na měření hmotnosti a převod na měrný objem. V první kapitole by probrán teoretický úvod k měření. V následujících dvou kapitolách návrh a sestavení prototypu. Obě kapitoly jsou podobně členěny na logické celky. První celek se zaměřuje na senzory. Postupuje od tenzometrického senzoru hmotnosti, přes zesílení signálu ze senzoru přístrojovým zesilovačem INA125, až k číslcovému 16- ti bytovému výstupu z A/D převodníku a řešení jeho reference. Následně se práce zabývá senzorem teploty DS18B20, který informativně snímá teplotu vody. Druhý celek řeší datové problémy, jejich zobrazení pomocí dvouřádkového LCD displeje a ukládání dat na SD kartu. Následující část popisuje ovládání pomocí číslcové membránové klávesnice o 4 řádcích a 3 sloupcích. Řídícím prvkem, který se stará o chod celého systému, je 16- ti bytový mikročip PIC24FJ64GA004. Poslední celek řeší napájecí politiku celého návrhu. Poslední kapitola sdružuje testování návrhu a problematiky měření. Přístroj se zaměřuje na kvalitativní stránku měření, jednoduchost obsluhy a eliminaci lidské chyby. Z toho důvodu je při měření pomalejší a dražší, než komerční přístroje na měření hmotnosti. Zařízení také bylo opatřeno mechanickými částmi přístroje a krytováním. Práce vnesla nový pohled na měření zkoumaných veličin, i když nebyly zcela kvantitativně ověřeny. Také úvodní myšlenka nastínění interpretace výsledků nebyla zcela splněna. A tak zůstává celkový význam práce nedořešenou kapitolou, která může být v archeologickém oboru jednou ze slepých větví analýz. Samotné dokázání významu metody měření a možných interpretací vzorů musí mít pevný základ v četnosti měření. Které by si zasloužilo samostatnou práci, již spíše zástupce archeologické obce. Díky volnému místu, okolo 40%, v programovatelné paměti mikroprocesoru a volným pinům pro I²C komunikaci, se naskýtá možnost celý proces pomocí motorů a posuvných pásů dále automatizovat, ale muselo by být velmi pohlíženo na ochranu samotných vzorků.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

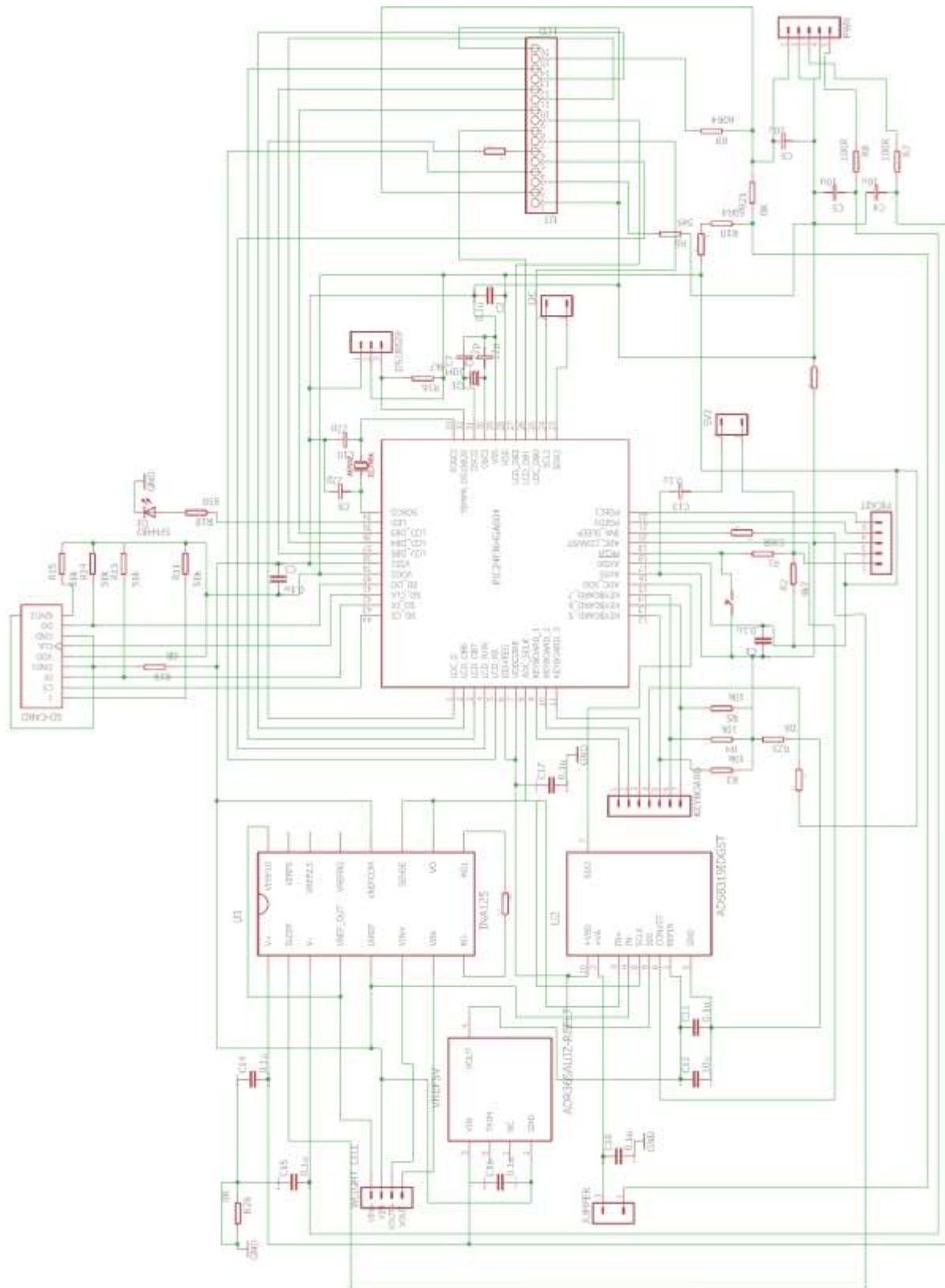
- [1] Konzervace předmětů z keramiky [online]. In:2010 [cit. 2015-11-15]. Dostupné z: <http://www.slu.cz/slu/cz/projekty/webs/zkvalitneni/vystupy-1/ua-a0018-zaklady-konzervace-pro-archeology/konzervace-a-restaurovani-keramiky/view>
- [2] HANYKÝŘ, Vladimír a Jaroslav KUTZENDÖRFER. Technologie keramiky. 1. vyd. Hradec Králové: Vega, 2000, 287 s., [10] s. barevných obrazových příloh. ISBN 80-900-8606-3.
- [3] Průměrné hodnoty tvrdosti vody [online]. 2015 [cit. 2015-11-15]. Dostupné z: www.vodarenska.cz/file/761_1_1
- [4] KATO, Tomoaki, Kazuhito OHASHI, Masayoshi FUJI a Minoru TAKAHASHI. Water absorption and retention of porous ceramics fabricated by waste resources [online]. 2008 [cit. 2015-11-15]. Dostupné z: <http://repo.lib.nitech.ac.jp/handle/123456789/5066>
- [5] ČSN 72 2603. Skúšanie tehliarskych výrobkov. Stanovenie hmotnosti, objemovej hmotnosti a nasiakavosti. 1979.
- [6] WEBER, Zdeněk a Lubomír ŠEBELA. Některé fyzikální parametry neolitické keramiky. 1974.
- [7] Senzory síly, tlaku a homtonsti [online]. [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <http://ulozto.cz/xG1x9G/tenzometry-rar>
- [8] VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSNÁ. Měření síly pomocí tenzometrů zapojených do můstku [online]. 2008 [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: feil.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske/STB/3_LU_tenzometry.pdf
- [9] Transfer Multisort Electronics- Electronic components [online]. [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: http://static4.tme.eu/products_pics/a/9/c/a9c5f75099f100a8ba27d64b5e705660/46392.jpg
- [10] SROVNAL, Vilém. Elektrotechnická měření: měřicí přístroje : pro SPŠ elektrotechnické. Vyd. 1. Praha: Informatorium, 2008, 140 s. ISBN 978-80-7333-062-0.
- [11] Katalogový list výrobce INA 125 [online]. 1998 [cit. 2015-11-30]. Dostupné z: www.ti.com/lit/ds/symlink/ina125.pdf
- [12] ADÁMEK, Milan. D/A a A/D převodníky: Prezentace [online]. [cit. 2015-11-30]. Dostupné z: https://www.fd.cvut.cz/personal/janes/zdt/prednasky/3_prevodniky.pdf
- [13] Katalogový list výrobce ADS8319 [online]. 2013 [cit. 2015-11-30]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads8319.pdf>
- [14] KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřicí obvody. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 239 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0145-4.
- [15] DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. [online]. [cit. 2016- 4]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>

- [16] Ina 125 Instrumentation Amplifier with Precision Voltage Reference. Texas instrument [online]. [cit. 2015-12-04]. Dostupné z: <http://www.ti.com/graphics/folders/partimages/INA125.jpg>
- [17] ADS8319 (ACTIVE) Precision 16-Bit SAR w/ SPI interface in MSOP-10 [online]. [cit. 2015-12-04]. Dostupné z: <http://www.ti.com/graphics/folders/partimages/ADS8319.jpg>
- [18] TIŠNOVSKÝ, Pavel. Externí sériové sběrnice SPI a I²C. ROOT.cz [online]. 2008 [cit. 2015-12-07]. Dostupné z: <http://www.root.cz/clanky/externi-seriove-sbornice-spi-a-i2c/>
- [19] New Waterproof Digital Thermal Probe or Sensor DS18B20. EBAY.COM [online]. [cit. 2016-5-14]. Dostupné z: <http://i.ebayimg.com/images/g/bCMAAOSwKfVXHw6p/s-l300.jpg>
- [20] SDK-9BNS-K13-GS-TB Paměťová Zásuvka. Farnell element14 [online]. [cit. 2015-12-07]. Dostupné z: http://cz.farnell.com/productimages/standard/en_GB/2469853-40.jpg
- [21] Dvouřádkový LCD displej. Tajned.cz [online]. 2014 [cit. 2015-12-07]. Dostupné z: <http://www.tajned.cz/2014/11/zaklady-ovladani-mikrokontroleru-atmega-14-dil-dvouradkovy-lcd-displej/>
- [22] RAYSTAR OPTRONICS RC1602B-GHY-CSXD. **TME Czech Republic s.r.o.** [online]. [cit. 2015-12-07]. Dostupné z: http://static1.tme.eu/products_pics/8/e/4/8e4ecfeba142ade6bb94c9e85658aa31/338521_t.jpg
- [23] Klávesnice 4x3 matrix - membránová. PTSHOP.CZ [online]. [cit. 2016- 5-14]. Dostupné z: http://www.ptshop.cz/fotky48100/fotos/_vyrp11_285SKU088310h.jpg
- [24] PIC24FJ64GA004. Microchip Technology Inc. [online]. [cit. 2015-12-13]. Dostupné z: http://www.microchip.com/_images/ics/small-PIC24FJ64GA004-TQFP-44.png
- [25] ADR360/ADR361/ADR363/ADR364/ADR365/ADR366:Low Power, Low Noise Voltage References with Sink/Source Capability Data Sheet . [online]. [cit. 2016-5-14]. Dostupné z: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADR360_361_363_364_365_366.pdf
- [26] XP POWER ECL15UT03-T AC/DC Napájecí Zdroj s Otevřenou Konstrukcí. Farnell element14 [online]. [cit. 2016- 5-14]. Dostupné z: http://cz.farnell.com/productimages/standard/en_GB/1289138-40.jpg
- [27] File:SD Circuit.JPG. Wikipedia.cz [online]. [cit. 2016- 5-14]. Dostupné z: http://hades.mech.northwestern.edu/index.php/File:SD_Circuit.JPG#filehistory
- [28] NAVRÁTIL, T. Záznamové zařízení pro železniční přejezdy: bakalářská práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008. 58 s., 6 příl.

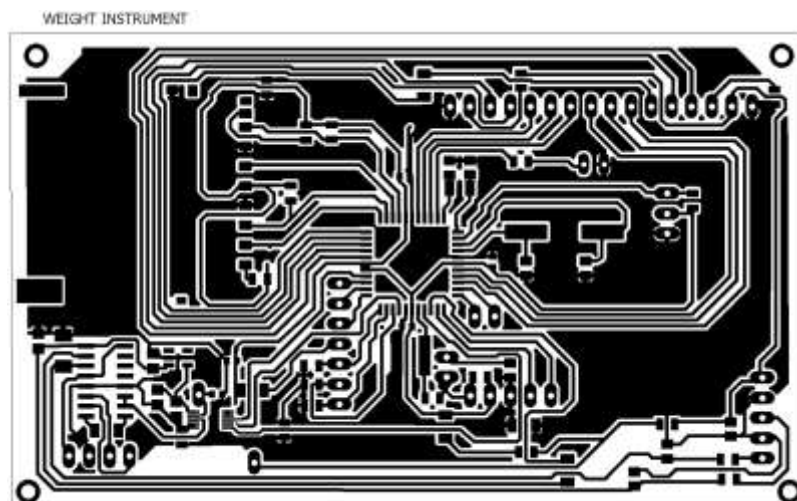
[29] NEZVAL, T. Záznamník událostí v reálném čase. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Šandera, Ph.D.

[30] ST7066U Dot Matrix LCD Controller/Driver [online]. [cit. 2016- 4]. Dostupné z: http://www.newhavendisplay.com/app_notes/ST7066U.pdf

A OBVODOVÉ ZAPOJENÍ



B DESKA PLOŠNÉHO SPOJE



Rozměry desky 100 x 60 [mm], měřítko M 1:1